



---

**Élelmiszertudományi Kar**

**Doktori értekezés**

**DINAMIKUS MÓDSZEREK KERTÉSZETI TERMÉNYEK  
JELLEMZÉSÉRE**

**Készítette:  
Zsorné Muha Viktória**

**Konzulens:  
Dr. Felföldi József egyetemi tanár**

**Budapesti Corvinus Egyetem  
Élelmiszertudományi Kar  
Fizika-Automatika Tanszék**

**Budapest, 2008**

## **A doktori iskola**

**megnevezése:** Élelmiszertudományi Doktori Iskola

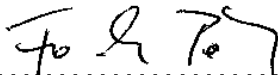
**tudományága:** Élelmiszertudományok


**vezetője:** Fodor Péter, DSc  
egyetemi tanár  
Alkalmazott Kémia Tanszék  
Élelmiszertudományi Kar  
Budapesti Corvinus Egyetem

**Témavezető:** Felföldi József, PhD  
egyetemi tanár  
Fizika-Automatika Tanszék  
Élelmiszertudományi Kar  
Budapesti Corvinus Egyetem

## **A doktori iskola- és a témavezető jóváhagyó aláírása:**

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, a műhelyvita során elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.

  
.....  
Az iskolavezető jóváhagyása

  
.....  
A témavezető jóváhagyása

**A Budapesti Corvinus Egyetem Élettudományi Területi Doktori Tanács 2007. december 11-i határozatában a nyilvános vita lefolytatására az alábbi bíráló Bizottságot jelölte ki:**

**BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG:**

**Elnöke**

Farkas József, MHAS

**Tagjai**

Láng Zoltán, DSc

Némethy Zoltánné Uzoni Hanna, PhD

Kállay Tamásné, CSc

Farkas István, DSc

**Opponensek**

Kaffka Károly, CSc

Fenyvesi László, PhD

**Titkár**

Baranyai László, PhD

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1</b>	<b>BEVEZETÉS</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>IRODALMI ÁTTEKINTÉS</b>	<b>5</b>
2.1	HAGYOMÁNYOS KEMÉNYSÉGMÉRÉSI MÓDSZEREK	5
2.2	ÜTÉSVIZSGÁLATI (IMPACT) MÓDSZER:	6
2.2.1	Az ütésvizsgálati módszer fejlődése	10
2.2.2	Keményiségmérő műszerek	19
2.2.3	Minősítő- és válogatósorok	22
2.2.4	Betegség vizsgálata impact módszerrel	26
2.2.5	Az ütésvizsgálati módszerrel kapcsolatos publikációk összefoglalása	28
2.3	AKUSZTIKUS MÓDSZER	29
2.3.1	Az akusztikus módszer elrendezéseinek típusai	33
2.3.2	In-vivo mérések	35
2.3.3	Végeselem módszerrel végzett vizsgálatok	37
2.3.4	Hogyan befolyásolja az alak az akusztikus jellemzőket?	39
2.3.5	Az akusztikus módszerrel kapcsolatos publikációk összefoglalása	41
<b>3</b>	<b>CÉLOK</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK</b>	<b>44</b>
4.1	AKUSZTIKUS MÓDSZER	44
4.2	ÜTÉSVIZSGÁLATI MÓDSZER	45
4.3	AKUSZTIKUS MÓDSZER ALKALMAZHATÓSÁGI KÖRÉNEK BŐVÍTÉSE	47
4.3.1	Végeselem modellezés (Ansys 10.0)	47
4.3.2	Paprika tárolás alatti puhulása	47
4.4	NYITOTT KÉRDÉSEK A DINAMIKUS KEMÉNYSÉGMÉRÉSBEN - METODIKAI VIZSGÁLAT	48
4.5	SÁRGARÉPA ÁLLOMÁNYVÁLTOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA AKUSZTIKUS ÉS ÜTÉSVIZSGÁLATI MÓDSZERREL	49
4.5.1	A sárgarépa mikrohullámú hőkezelése	50
4.5.2	Sárgarépa akusztikus vizsgálata	50
4.5.3	Répaminták ütésvizsgálati módszerrel történő mérése	50
4.5.4	Dielektromos mérések	51
4.5.5	Hagyományos penetrométeres mérés	51
4.6	IN-VIVO KÍSÉRLETEK AKUSZTIKUS MÓDSZERREL	52
<b>5</b>	<b>EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK</b>	<b>53</b>
5.1	AZ AKUSZTIKUS MÓDSZER ALKALMAZHATÓSÁGI KÖRÉNEK BŐVÍTÉSE	53
5.1.1	Mérési elrendezés vizsgálata	53
5.1.1.1	A megfelelő gerjesztési pont kiválasztása	54
5.1.2	Paprika állományváltozásának követése akusztikus módszerrel	55
5.1.3	A paprika test puhulás alatti frekvenciaváltozásának vizsgálata modellezéssel	57
5.1.3.1	A modell létrehozása	57
5.1.3.2	A modell rezgéselemzése	58
5.1.3.3	A rezonancia frekvencia függése az objektum keménységétől	59
5.1.4	A paprika tárolás alatti puhulása	60
5.2	NYITOTT KÉRDÉSEK A DINAMIKUS KEMÉNYSÉGMÉRÉSBEN – METODIKAI VIZSGÁLATOK	66
5.2.1	A fejlesztett műszer alkalmasságának vizsgálata	67
5.2.2	Metodikai vizsgálatok biológiai anyagokon	70
5.2.3	Rugalmas mérőfej alkalmazhatóságának vizsgálata	75
5.2.4	A hőmérséklet hatása az ütésvizsgálati keménységtényezőre	78
5.2.5	A kézi impactor alkalmasságának vizsgálata a termények minősítésére	81
5.3	SÁRGARÉPA ÁLLOMÁNYVÁLTOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA AKUSZTIKUS ÉS ÜTÉSVIZSGÁLATI MÓDSZERREL	87
5.3.1	Az egész sárgarépa minták keménységének változása	88
5.3.2	A sárgarépa minták belsejében történő változások vizsgálata	90
5.3.3	Sárgarépa korongok jellemzőinek változása	93
5.3.4	Az ütésvizsgálati, az akusztikus módszerrel és a hagyományos keménységméréssel kapott állományjellemzők összehasonlítása	97
5.4	IN-VIVO KÍSÉRLETEK AKUSZTIKUS MÓDSZERREL	99
5.4.1	A növényen lévő paradicsombogyó akusztikus jelének vizsgálata	99
5.4.2	A fejlődés és érés során kapott jellemző rezonancia frekvenciaértékeinek változása	100
5.4.3	A paradicsombogyók térfogatváltozása a kísérlet során	102

5.4.4	<i>A paradicsomok sűrűségének vizsgálata.....</i>	<i>104</i>
5.4.5	<i>A paradicsombogyók akusztikus keménységtényezőjének változása a kísérleti idő alatt.....</i>	<i>107</i>
5.4.6	<i>A paradicsomok keménységváltozása a növekedés és érés során.....</i>	<i>111</i>
5.4.7	<i>A paradicsom bogyók tárolás alatti keménységváltozása.....</i>	<i>114</i>
<b>6</b>	<b>JAVASLATOK TOVÁBBI TUDOMÁNYOS MUNKÁRA, GYAKORLATI ALKALMAZÁSRA .....</b>	<b>118</b>
<b>7</b>	<b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>119</b>
7.1	SUMMARY .....	121
<b>8</b>	<b>ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....</b>	<b>123</b>
<b>9</b>	<b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>	<b>125</b>
<b>10</b>	<b>MELLÉKLET .....</b>	<b>133</b>
10.1	PAPRIKA TÁROLÁS ALATTI VÁLTOZÁSA .....	133
10.2	HIBATERJEDÉSI TÖRVÉNY TÉRFOGATSZÁMÍTÁSRA.....	138
10.3	HIBATERJEDÉSI TÖRVÉNY TÖMEGBECSLÉSRE.....	138
10.4	A GÖMB ALAKÚ TEST REZONANCIA FREKVENCIÁJÁNAK VÁLTOZÁSA A SZIMULÁLT NÖVEKEDÉS SORÁN.....	139
10.5	A GÖMB ALAKÚ TEST REZONANCIA FREKVENCIÁJÁNAK VÁLTOZÁSA A SZIMULÁLT PUHULÁS SORÁN .....	140
10.6	GUMI MÉRŐFEJ KARAKTERISZTIKÁJA .....	141

## 1 BEVEZETÉS

Az elmúlt néhány évtizedben számos módszert fejlesztettek ki mezőgazdasági (kertészeti) termények minőségének meghatározására, válogatására. Ezek a módszerek arra épülnek, hogy a mért fizikai tulajdonságok jó korrelációt mutatnak a termény bizonyos minőségi jellemzőjével. Tehát a mért fizikai paraméterből (közvetve) következtethetünk a minta minőségére. Mi, emberek az érzékszerveinkre támaszkodva (látás, tapintás, szaglás) alkotunk véleményt az adott zöldségről, gyümölcsről. Először megnézzük, és ha azt megfelelő színűnek, alakúnak, méretűnek és állapotúnak (betegségtől, romlástól mentesnek) találjuk, tovább vizsgáljuk és az állományával kapcsolatosan szerzünk információt. Ekkor megtapogatjuk, megnyomogatjuk és az érettségről, eltarthatóságról próbálunk információt szerezni. Ezután a jó érzékszervekkel rendelkezők megszagolják a gyümölcsöt, zöldséget s a belső jellemzőire (pl. erősségre, édességre, zamatosságra) próbálnak következtetni. A döntés az összes érzékszervünkkel gyűjtött információból születik meg. Bár egy-egy gyümölcs, zöldség minőségének megfogalmazásában az emberi érzékelést, döntési sort nem tudják teljesen visszaadni az erre a célra kifejlesztett módszerek/műszerek, de a kutatásban és a kereskedelemben a műszeres mérést gyakran előnyben részesítik az érzékszervi vizsgálatokkal szemben. Hiszen így kizárhatják a szubjektivitást és egy objektív képet kaphatnak a mintáról, ezenfelül ezek a technikák egy „közös nyelvet” is nyújthatnak, ami útmutatást ad, mind a kutatásban, mind az iparban és a kereskedelemben, mind a termelő, mind pedig a fogyasztók számára.

A zöldségek, gyümölcsök egyik legfontosabb minőségre utaló paramétere a keménység. Ha a termény keménységméréséről beszélünk, a referenciaként elfogadott roncsolásos technikák jutnak az eszünkbe. A kutatás azonban egyre inkább a roncsolásmentes módszerek felé fordul, hiszen számos előnyük van a „hagyományos”, roncsolásos technikákkal szemben. Ezek a következők:

- a vizsgálattal nem avatkozunk bele a minta életfolyamataiba, így a vizsgálat után is tovább tárolható a termény,
- kutatási szempontból is nagyon fontosak a roncsolásmentes módszerek. Ugyanis a tárolás alatti változás pontosan követhető, mert módunkban áll minden alkalommal ugyanazt a terményt vizsgálni, ezzel pontosabb képet kapunk a tárolás során bekövetkező élettani és állománybeli változásáról,
- a minta mérés után is értékesíthető, feldolgozható, tehát gazdaságilag előnyösebb a roncsolásmentes vizsgálat a roncsolásosnál,
- mivel a vizsgálat rövid ideig tart, ezek a módszerek alkalmasak on-line válogató, minősítősorba való beépítésre és így nagy mennyiségű termény vizsgálata is rövid idő alatt lehetséges,

- könnyen telepíthető, egyszerűen használható, hordozhatóvá tehető, így lehetőség nyílik méréseket végezni a termény átvételénél, illetve szabadföldön is,
- nem igényel minta-előkészítést, ezért időt, pénzt takaríthatunk meg.

Dolgozatom célja, hogy a korábban alkalmazott hagyományos roncsolásos, illetve a roncsolásmentes állománymérés hátrányainak kiküszöbölésére a korszerű és folyamatos fejlődésben lévő roncsolásmentes gyorsmódszerek alkalmazhatóságát vizsgáljam.

## 2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1 Hagyományos keménységmérési módszerek

A kertészeti termények fontos minőségi paramétere a keménység, hiszen információt szolgáltat a termény betakarításához, illetve a termény további, a szedését követő felhasználásához. Élelmiszeripari szempontból kiemelt jelentőséggel bír e termékjellemző, hiszen minőségjellemzőként útmutatást ad a nyersanyagok átvételéhez, feldolgozásához illetve további tárolásukhoz.

A zöldségek és a gyümölcsök keménységének mérésére számos hagyományos módszer és műszer létezik. Ezek közé sorolható például a széles körben elfogadott és általánosan elterjedt, Magness-Taylor-féle vizsgálat, amely egy egyszerű és gyors, azonban roncsolásos vizsgálati módszer. Ennél a módszernél a termény felületére merőlegesen, egy gömbsüvegben végződő hengeres nyomófejet nyomunk a terménybe és mérjük a penetrációhoz (a behatoláshoz) szükséges maximális erőt. A fejlettebb hagyományos állományvizsgáló műszerek közé tartoznak az ún. precíziós penetrométerek (SMS, Instron, ZWICK stb.), amelyekkel a nyomófejet egyenletes sebességgel nyomjuk a terménybe. A nyomófej alakja és mérete különböző lehet. A vizsgálat közben nagy pontossággal mérhetjük a terményre ható erőt és a hatására keletkezett deformációt. Ezen erő-deformáció görbe jellemző paramétereiből következtethetünk a minta mechanikai tulajdonságaira. Az előbb említett nyomófeszültség-mérésen alapuló módszerek mellett alkalmazzák még a termény keménységét nyírófeszültség-mérés alapján mérő módszereket is. Ilyen például a Massey Twist Tester, amivel elsősorban a termény húsának keménységéről kapunk információt. A mérés során egy merev téglalap alakú késpengét nyomunk a mintába, majd a kés hosszanti tengelye mentén elfordítjuk azt. A műszer az idő függvényében méri az elfordulást, ami arányos a keletkezett nyomatékkal. Az eredményekből meghatározható a termény biofolyási és roncsolási feszültsége (Borsa et al., 2002). További említésre méltó műszer a keménység mérésére az MGA-1091 típusú kézi elektronikus peneterométer. A mérés során a terménybe a nyomófejet egy előre meghatározott deformációs mélységig nyomjuk bele és mérjük az ehhez szükséges maximális erőt. Mivel a deformációs mélység tized milliméterekben mérhető (0,15 mm, 0,3 mm, 0,6 mm), ezért a mérés lágyabb, rugalmasabb termények esetében roncsolásmentesnek, míg kemény termények esetében kvázi-roncsolásmentesnek tekinthető (Borsa et al., 2002).

A fent említett módszerek széles körben elfogadott, referenciaként használható módszerek, illetve műszerek, azonban számos hátrányuk van. Többségük roncsolásos vagy kvázi-roncsolásos vizsgálatot tesz lehetővé, időigényes a minta mérése, illetve az adatok elemzése, valamint a mérések többnyire laborhoz kötöttek és nem automatizálhatók.



Ezért doktori munkám során az állomány mérésére alkalmas két roncsolásmentes, dinamikus módszert vizsgáltam. Ezek az ütésvizsgálati (impact) és akusztikus módszer. A következő oldalakon ezzel a két módszerrel kapcsolatos publikációkból nyújtok áttekintést, bemutatva az ezen a területen történt fejlődést és a két módszer használhatóságának lehetőségeit.

## 2.2 Ütésvizsgálati (impact) módszer

A vizsgálat során egy ütközés történik; összeütközik a minta és egy erő- vagy gyorsulásérzékelő. Ekkor lendület, illetve sebességváltozás következik be. A vizsgálat alapja az, hogy ez a változás összefüggésben van a minta mechanikai tulajdonságaival. Ezzel a mérési technikával a termény felületi keménységéről kapunk információt. Az ütésvizsgálati módszerrel számos kutatócsoport foglalkozik mind elméleti, mind gyakorlati szempontból. Sokfajta zöldség, gyümölcs keménységét, állományát mérték már eddig is az impact módszer segítségével. Mind a kis tömegűeket (pl. áfonya, málna), mind a közepes méretűeket (alma, őszibarack, kivi, körte), mind a nagyobb átmérőjűeket (pl. sárgadinnye). Ebből is látható, hogy milyen sokrétű a használhatósága. A mérési elrendezés különbözősége mellett, talán ez is az egyik oka annak, hogy a kapott erő illetve gyorsulási görbe értelmezése nem egységes. A görbe számos paraméterének segítségével határozzák meg a minta mechanikai jellemzőit. Általában az időbeli változást veszik figyelembe, de pl. Delwiche et al. (1987 és 1987a) az időbeli változás mellett a frekvencia alapú változást is vizsgálták. Több kutató is (pl. Jarén et al. (2002), Ortiz et al. (2001), Steinmetz et al. (1996), Salvadores et al. (2000), Diezma et al. (2000)) nemcsak az időben változó gyorsulásgörbét és annak jellemzőit vizsgálja, hanem az első és a második integrálja segítségével kapott sebesség és deformáció görbe jellegzetes pontjait is. Sok kutató (pl. P. Chen et al. (1996), Homer et al. (2002), Arana et al. (1998), Steinmetz et al. (1996a), Moltó et al. (1996)) egyszerűen csak a maximális erőt vagy gyorsulást veszi figyelembe, mint keménységtényezőt, de vannak, akik (pl. De Ketelaere et al. (2001), Ortiz-Canavate et al. (2001), Delwiche et al. (1987), Zhang et al. (1994), Ozer et al. (1998), Shmulevich et al. (2003)) az úgynevezett C1 és C2 keménységtényezőket használják. Ahol C1 a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa

$$C1 = F_{\max} / T_{\max}, \quad (2.1)$$

míg a C2 a maximális erő és a maximum erőig tartó idő négyzetének hányadosa

$$C2 = F_{\max} / T_{\max}^2. \quad (2.2)$$

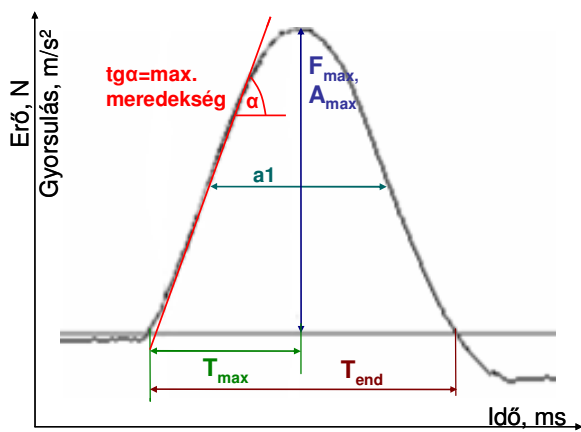
A kutatók által használt paraméterekről az 1. táblázat nyújt áttekintést, illetve az 1. ábra néhány paraméter értelmezését segítheti elő.

**1. táblázat:** A kutatók által használt impact paraméterek áttekintése

Impact paraméter	Termény	Publikáció
$F_{\max}$ : maximális erő vagy $A_{\max}$ : maximális gyorsulás	paradicsom, őszibarack, alma, körte, sárgabarack, nektarin, kivi, narancs, mandarin, avokádó	Correa et al. (1992), Jarén et al. (1996), Steinmetz et al. (1996), Steinmetz et al. (1996a), P. Chen et al. (1996), P. Chen et al. (1996a), Moltó et al. (1996), Arana et al. (1998), P. Chen et al. (1998), Salvadores et al. (2000), Diezma et al. (2000), Ortiz et al. (2001), Ortiz-Canavate et al. (2001), Homer et al. (2002), Jarén et al. (2002), Arana et al. (2004)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa ( $C1=F_{\max}/T_{\max}$ )	őszibarack, alma, sárgadinnye, körte, kivi, narancs, mandarin	Delwich et al. (1987), Delwich (1987a), Zhang et al. (1994), P. Chen et al. (1996a), P. Chen (1996), Moltó et al. (1996), Steinmetz et al. (1996a), P. Chen et al. (1998), Ozer et al. (1998), De Ketelaere et al. (2001), Ortiz-Canavate et al. (2001), Homer et al. (2002), Shmulevich et al. (2003),
$D_{\max}$ : Maximális deformáció	őszibarack, alma, nektarin, körte, sárgabarack, avokádó	Correa et al. (1992), Jarén et al. (1996), Steinmetz et al. (1996), Arana et al. (1998), Salvadores et al. (2000), Diezma et al. (2000), Ortiz et al. (2001), Jarén et al. (2002), Arana et al. (2004)
$T_{\max}$ : a maximum erőig tartó idő	őszibarack, sárgadinnye, alma, sárgabarack, körte, narancs, mandarin, avokádó	Correa et al. (1992), Zhang et al. (1994), Steinmetz et al. (1996), Steinmetz et al. (1996a), Jarén et al. (1996), Moltó et al. (1996), Ozer et al. (1998), Diezma et al. (2000), Salvadores et al. (2000), Ortiz et al. (2001), Shmulevich et al. (2002), Jarén et al. (2002), Arana et al. (2004)
$E_{\text{abs}}$ : elnyelt energia	őszibarack, alma, körte, sárgabarack, nektarin	Zhang et al. (1994), Steinmetz et al. (1996), Salvadores et al. (2000), Diezma et al. (2000), Ortiz et al. (2001), Arana et al. (2004)
$E_{\max}$ : maximális energia	őszibarack, alma, körte, sárgabarack	Steinmetz et al. (1996a), Diezma et al. (2000), Ortiz et al. (2001),
$D_{\text{perm}}$ : maradandó deformáció	őszibarack, alma, körte, sárgabarack, nektarin	Arana et al. (1998), Salvadores et al. (2000), Diezma et al. (2000), Ortiz et al. (2001), Arana et al. (2004)
$F_{\max}/D_{\max}$	őszibarack	Steinmetz et al. (1996)
Impact görbe maximális meredeksége	őszibarack, alma	Ortiz-Canavate et al. (2001), Homer et al. (2002)
Impact görbe átlagos meredeksége	őszibarack, alma, kivi, avokádó	Correa et al. (1992), P. Chen et al. (1996a), P. Chen et al. (1998), Ortiz- Canavate et al. (2001), Homer et al. (2002), Jarén et al. (2002),
C2: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő négyzetének hányadosa ( $C2=F_{\max}/T_{\max}^2$ )	őszibarack, sárgadinnye, alma, körte, narancs, mandarin	Delwich et al. (1987), Delwich (1987a), Steinmetz et al. (1996a), Jarén et al. (1996), Moltó et al. (1996), Ozer et al. (1998), Shmulevich et al. (2003)

Az impact görbe frekvencia spektruma	őszibarack	Delwich et al. (1987), Delwich (1987a)
Az impact görbe aszimmetriája	őszibarack, sárgadinnye	Zhang et al. (1994), Ozer et al. (1998)
Az időben változó impact görbe első 2 vagy 3 csúcsa	sárgadinnye, őszibarack	Ozer et al. (1998), Burgos (2002)
$A_{FT}$ : a maximális erő és a hullám végéig tartó idő hányadosa ( $A_{FT}=F_{max}/T_{end}$ )	sárgadinnye	Ozer et al. (1998)
$T_{end}$ : a hullám végéig eltelt idő	sárgadinnye, őszibarack, narancs, mandarin, alma, körte	Moltó et al. (1996), Ozer et al. (1998), Harker et al. (2002), Jarén et al. (2002)
A következő hullámok kezdetének ideje	sárgadinnye	Ozer et al. (1998)
$a_1$ : A maximális erő feléhez tartozó hullámszélesség	őszibarack, narancs, mandarin	Steinmetz et al. (1996a), Moltó et al. (1996), Burgos (2002)
$F_{max1}^2/m$ : az első csúcsához tartozó maximális erő négyzete osztva a termény tömegével	őszibarack	Burgos (2002)
$m/Tp_2^2$ : a termény tömege osztva a második hullám maximumáig tartó idő négyzetével	őszibarack	Burgos (2002)
$F_{max1}/a_1$ : az első csúcsához tartozó maximális erő és a maximális erő feléhez tartozó hullámszélesség aránya	őszibarack	Burgos (2002)
$IQ$ : a maximális erő és az első hullám alatti terület négyzetének hányadosa szorozva egy rendszerre jellemző konstanssal ( $C*(F_{max}/\int p(t)dt)^2$ )	alma	Shmulevich et al. (2002, 2003)
$1/\Delta T^2$ : az első hullám maximumáig tartó idő négyzetének reciproka	paradicsom, alma, sárgabarack, őszibarack, paprika	Felföldi és Ignát (1999), Fekete és Felföldi (2002), Ignát et al. (2003), Istella et al (2003), Tompos et al. (2003)

Az is sok kutatás középpontjában áll, hogy az impact módszerrel kapott keménység mennyire függ össze az általánosan elfogadott Magness-Taylor-féle keménységméréssel. Az eredmények változóak. Vannak, akik nagyon jó korrelációt találtak a kétfajta keménységmérési módszer eredményei között (pl. P. Chen et al. (1996a) és De Ketelaere et al. (2001)), de vannak, akik nagyon alacsony  $R^2$  értéket kaptak (pl. Ortiz et al. (2001) és Burgos (2002)). Ezt okozhatja a különböző mérési elrendezések használata, a különböző paraméterek alkalmazása, a különböző anyagok mérése, de azonos gyümölcs csoporton belüli, fajták okozta különbségről is olvashatunk Zhang et al. (1994), Ozer et al. (1998) és Shmulevich et al. (2002, 2003) publikációjában is.



**1. ábra:** Néhány jellemző impact paraméter

A 2. táblázat bemutatja a feldolgozott publikációk eredményeit a Magness-Taylor-féle keménység és az impact módszerrel mért keménység összehasonlítására vonatkozóan. Ozer és társai (1998) szerint jobb az összefüggés, ha nem a Magness-Taylor-féle méréssel korreláltatják az ütésvizsgálati módszerrel kapott keménységet, hanem a minta síklappal történő megnyomásával számítják ki a termék rugalmassági modulusát.

Ez szerintem annak köszönhető, hogy a síklapos megnyomással kapott rugalmassági tényező közelebb áll az ütésvizsgálati keménységtényezőhöz, mert a Magness-Tayloros mérés nemcsak a felület közeli tulajdonságot méri, hanem a hús szilárdsága is nagyban befolyásolja a kapott erőértéket.

Burgos és társai (2002) publikációjukban azt vizsgálták, hogy a penetrációs görbe mely paramétere alkalmas arra, hogy referencia legyen, amelyet összehasonlíthatnak az IVIA által fejlesztett impact berendezés eredményeivel. Négy fajta barackot 4 hétig tároltak s azt a paramétert tekintették referenciának, ami a tárolási idő alatt legjobban változott, hiszen ez a legérzékenyebb változó. Arra a következtetésre jutottak, hogy nem a Magness-Taylor-féle keménység a leginformatívabb, hanem a Young modulus. Erre a következtetésre jutottak Shmulevich és munkatársai (2001) is. Ezek alapján felmerül a kérdés, hogy:

*Van-e és ha van milyen összefüggés található a „hagyományos”, referenciaként elfogadott módszerrel és az ütésvizsgálati módszerrel kapott keménységtényező között?*

Ennek a kérdésnek a megválaszolása azért lenne fontos, mert akkor lehetőség lenne egy sokkal gyorsabb, kevésbé drága és főleg roncsolásmentes keménységvizsgálatra. Esetleg kiegészíthetők vagy kiválthatók lennének jelenleg a keménység meghatározására használatos klasszikus, roncsolásos állományvizsgálati pl. kompressziós módszerek.

**2. táblázat:** Az impact módszerrel és a Magness-Taylor-féle méréssel kapott keménységek korrelációja

Impact paraméter	Termény	R <sup>2</sup> vagy R	Publikáció
a1: A maximális erő feléhez tartozó hullámszélesség	őszibarack	R=0,57-0,82	Burgos (2002)
A <sub>max</sub> : maximális erő	őszibarack, kivi	R <sup>2</sup> =0,885	P. Chen et al. (1996a)

Az impact görbe frekvencia spektruma	őszibarack	R=0,79-0,81	Delwich et al. (1987)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa	alma	R=0,43	Ortiz-Canavate et al. (2001)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa	őszibarack	R=0,87	Ortiz-Canavate et al. (2001)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa	őszibarack	R=0,76	Delwich et al. (1987)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa	őszibarack	R=0,89	Zhang et al. (1994)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa	őszibarack, kivi	R <sup>2</sup> =0,875	P. Chen et al. (1996a)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa	paradicsom	R=0,90	De Ketelaere et al. (2001)
C1: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő hányadosa	őszibarack	R <sup>2</sup> =0,84	P. Chen et al. (1998)
C2: a maximális erő és a maximum erőig tartó idő négyzetének hányadosa	őszibarack	R=0,75	Delwich et al. (1987)
D <sub>max</sub> : Maximális deformáció	őszibarack	R=-0,71	Ortiz et al. (2001)
D <sub>perm</sub> : maradandó deformáció	őszibarack	R=0,06	Ortiz et al. (2001)
E <sub>abs</sub> : elnyelt energia	őszibarack	R=0,19	Ortiz et al. (2001)
F <sub>max</sub> : maximális erő	alma	R=0,29	Ortiz-Canavate et al. (2001)
F <sub>max</sub> : maximális erő	őszibarack	R=0,81	Ortiz et al. (2001)
F <sub>max</sub> : maximális erő	őszibarack	R=0,84	Steinmetz et al. (1996)
F <sub>max</sub> : maximális erő	őszibarack	R=0,81	Ortiz-Canavate et al. (2001)
F <sub>max</sub> : maximális erő	őszibarack	R <sup>2</sup> =0,83	Chen et al. (1998)
Impact görbe átlagos meredeksége	alma	R=0,41	Ortiz-Canavate et al. (2001)
Impact görbe átlagos meredeksége	őszibarack	R=0,87	Ortiz-Canavate et al. (2001)
Impact görbe átlagos meredeksége	őszibarack	R <sup>2</sup> =0,81	P. Chen et al. (1998)
Impact görbe átlagos meredeksége	őszibarack, kivi	R <sup>2</sup> =0,92	P. Chen et al. (1996a)
T <sub>max</sub> : a maximum erőig tartó idő	alma	R <sup>2</sup> <0,60	Schmulevich (2002)
T <sub>max</sub> : a maximum erőig tartó idő	őszibarack	R=-0,29	Ortiz et al. (2001)
T <sub>max</sub> : a maximum erőig tartó idő	őszibarack	R=0,73	Zhang et al. (1994)

### 2.2.1 Az ütésvizsgálati módszer fejlődése

Az ütésvizsgálati módszer is számos fejlődésen ment keresztül az évek során. Nemcsak az impact görbe értelmezésében nincs egyezés, hanem a mérés módjában sem. Két különböző elrendezésre osztanám a méréseket. Mindkettőnek megvan a maga előnye és hátránya.

#### Első elrendezés- a minta ejtése az érzékelőre

Az első elrendezésnél a mintát ejtik az érzékelőre, tehát az érzékelő áll és a minta mozog (szabadon esik). Az érzékelő egy szilárd, merev sík lap. Az elrendezés előnye, hogy könnyen kivitelezhető és végrehajtható a mérés.

Véleményem szerint az egyik legfontosabb publikáció ebben a témakörben Delwiche (1987) nevéhez fűződik. A kutató fontosnak tartotta, az impact erő jellemzői és a termény paraméterei

közötti összefüggés meghatározását. Ezért az impact módszert elméleti szempontból vizsgálta. Célja volt a termény megütése során kapott erő előrejelzése létező impact modellt használva. További célja volt meghatározni a termény jellemzőinek (tömeg, görbületi sugár, rugalmasság) és az impact jellemzők (érintkezési sebesség vagy ejtési magasság) hatását az ütésre kapott időben és frekvenciában változó impact görbére. Delwiche az ütközés modellezésére a Hertz elméletet használta fel. A Hertz elmélet elasztikus, gömb (konvex) alakú testek összeütközését írja le. Bár a zöltségek, gyümölcsök viszkoelasztikus tulajdonságúak, de az egyszerűbb használat miatt elasztikus testeknek tekintette a kutató. Delwiche szerint ezt számos indok támasztja alá, miszerint az elasztikus modell egy jó közelítést ad az impact erő meghatározására és minimális számú tulajdonságot tartalmaz a mintára nézve, és ezek a tulajdonságok mérése relatíve könnyű. Hivatkozik Rumsey és Fridley (1977) cikkére, akik rámutattak arra, hogy az elasztikus és viszkoelasztikus testekre kapott modell csak kis mértékben különbözik egymástól. Mivel az ütésvizsgálati módszer ilyen típusú elrendezésénél a test egy kemény, sík érzékelővel ütközik, a sík testet úgy tekintette, mintha egy végtelen nagy sugarú gömb lenne. A kisebb sugarú test (minta) keménységét jóval kisebbnek feltételezte a másik (érezkelő) test keménységéhez viszonyítva.

Különböző problémák merülnek fel szerintem ezzel a modellel kapcsolatosan, miszerint az elmélet feltételezi a homogén testet, ami egy biológiai anyagnál nem adott; ezen kívül statikus megnyomást modellez és nem dinamikus ütközést. A korrekt elméleti modell leírása még a mai napig várat magára.

A kísérlet második részében vizsgálta, hogyan függ a kapott impact görbe a termény paramétereitől és az ütésvizsgálati jellemzőktől. Behatóan a C1 (2.1) és C2 (2.2) jellemzőt –ezek idő-alapúak– és a frekvencia-alapú jellemzőket vizsgálta Delwiche. Megállapította, hogy a C2 érzékenyebb a rugalmassági tényező változására és kevésbé érzékeny a minta tömegére és a görbületére, mint a C1 jellemző, de mind a két idő-alapú jellemző nagyon kis mértékben függ a minta geometriájától. A frekvencia-alapú jellemzőkre a minta tömege és görbülete közepesen volt hatással. Azonban mind az idő-alapú, mind a frekvencia-alapú jellemzők nagymértékben függtek az érintkezési sebességtől, illetve ejtési magasságtól. Ezért Delwiche azonos érintkezési sebességű mérést javasol.

Véleményem szerint ez a feltétel (azonos érintkezési sebesség) ilyen típusú elrendezésnél nehezen oldható meg az érzékelő ejtési technika esetében ez könnyebben megvalósítható.

Delwiche és tsai (1987a) az elméleti összefüggés mellett gyakorlati szempontból is vizsgálták a módszert. A céljuk őszibarackok szétválasztása érettség alapján 4 kategóriába: éretlen, éretlen és érett határa, érett és túlérrett. A mintákat 3 cm-ről ejtették az érzékelőre és az ebből adódó sérülést elhanyagolhatónak becsülték. A vizsgálatokhoz széles méret és érettségi tartományból származtak a minták. Az eredmények értékelésénél azt tapasztalták, hogy az adatoknak a vártnál nagyobb a variabilitása. Az adatok elemzése során kiderült, hogy ez a termények különböző tömegéből és

más-más görbületéből adódott. Megállapították, hogy a kapott impact tényező bár kismértékben, de függ a termény geometriai paraméteritől. Továbbá vizsgálták, hogy mennyire befolyásolja a kapott eredményt, ha különböző helyen ütik meg a barackot. A gyümölcsök keménységét 6 helyen (két oldal, varrat, váll rész, alja és teteje) vizsgálták. A megütési helyek között szignifikáns különbséget találtak. Ez egybevágott megfigyelésükkel, miszerint a varratnál kezd először puhulni a barack, és a tetején a legkeményebb. Ezek alapján „bázisnak”, mért jellemzőnek az oldalt való megütést választották és ezt a paramétert használták fel a válogatáshoz. Így egyértelműen el tudták különíteni az érett és éretlen barackokat egymástól.

Ebből is látszik, hogy a módszer csak arról a területről ad információt, ahol találkozott az érzékelővel. Ez lehet előny is, hiszen a mérés érzékenysége miatt egy újabb megfigyelést tudtak alátámasztani az őszibarack érésével, puhulásával kapcsolatosan, de lehet hátrány is ha a minta egészéről szeretnénk információt. Ez különösen akkor probléma, ha nem egy „átlagos állományú” részt mérünk, hanem éppen egy sérült vagy beteg (varratos) rész megütéséből kapunk információt.

Ozer és tsai (1998) az ütésvizsgálati módszer legnagyobb hátrányára (miszerint lokális tulajdonságot mérünk vele) próbáltak megoldást találni, ezen kívül behatóan vizsgálták a módszer roncsolásmentességét sárgadinnye ejtése során. A mérés során a dinnyét 2 cm-ről ejtették az érzékelőre és az első 3 „pattanást” figyelték az idő függvényében. A mérés előtt előzetesen vizsgálták, hogy tényleg roncsolásmentes-e ezen paraméterekkel az elrendezés. A roncsolásmentesség vizsgálatához az érett és félérett sárgadinnyét a mérések során használt 2 cm-es magassághoz képest kétszer olyan magasságról (4 cm-ről) ejtették le. Az ejtési pontokat megjelölték és 10 napos szobahőmérsékleten való tárolás után sem tapasztaltak látható sérülést. A mintákat mikroszkóposan is vizsgálták. Egy vékony réteget vágtak le a megütött helyről, és kémiai anyaggal festették meg. Ahol sérülés keletkezett a szövetben ott egy színváltozás következik be. Referenciaként a meg nem ütött szövetből vettek mintát. Sérülésre utaló jelet még így sem találtak. Tehát megállapították, hogy ez az elrendezés, ezzel a paraméterekkel a sárgadinnyére teljesen roncsolásmentes.

A másik céljuk az ütésvizsgálati módszer lokális tulajdonságának kiküszöbölése volt. Erre a problémára egy nagyon egyszerű és kézenfekvő megoldást javasoltak, miszerint egy terményen több mérést kell elvégezni, és a kapott adatokat átlagolni kell, s ekkor jobb eredményt érhetünk el.

Egyetértek a kutatókkal, hogy a termény variabilitásából adódó hibák kiküszöbölésére jó megoldás a több pont mérésével kapott eredmény átlagolása, azonban én a több pont átlagolása mellett még egy másik, nem lokális tulajdonságot mérő módszerrel (pl. akusztikus) való kiegészítést is ajánlanék a pontosabb keménység-meghatározáshoz.

Hasonló témát taglaltak Zhang és társai (1994). Az akusztikus és az ütésvizsgálati módszerrel kapott keménységet hasonlították össze a barack érettségére általánosan használt húskeménység (Effegi keménységmérő) és alapszín (Minolta Chroma Meter) vizsgálatával. A keménységmérést a barack mindkét „orcáján” elvégezték, míg a színmérést csak az éretlenebb oldal (alapszín) több helyén. Négy barackfajta gyümölcsseit vizsgálták széles érettségi tartományban. A mintákat szobahőmérsékleten tárolták néhány napig. A vizsgálat előtt a pelyheket letörölték, hogy ne zavarja a méréseket. Először a színmérést, majd az akusztikus vizsgálatot, utána az impact módszerrel történő keménység meghatározást, végül a referencia módszerrel történő húskeménység mérést végezték el. Az ütésvizsgálatnál a barackokat vákuum segítségével tartották az érzékelő felett és annak megszűnése után esett a minta egy kemény felületű erőérzékelőre. Az őszibarack alja és az erőérzékelő közötti távolságot 50 mm-re állították be. Minden egyes terményt a vákuumos tartás előtt pozícionálni kellett, hogy az oldalára essen. A kapott idő-alapú impact görbe 4 paraméterét figyelték: érintkezési idő (a görbe első hullámának lecsengési ideje), a maximális erő osztva az addig eltelt idővel (C1), elnyelt energia és az első csúcs (hullám) aszimmetriája. A vizsgálatokból megállapították, hogy a Magness-Taylor-féle (Effegi) keménységmérés bár jól követte a puhulást (csökkent az értéke az idő függvényében), de a kapott szórás kétszer, háromszor nagyobb volt, mint az ütésvizsgálati vagy akusztikus módszernél. Megfigyelték azt is, hogy az alapszín változása leginkább fajtától függő jellemző és nem korrelál jól a keménységváltozással. A két roncsolásmentes keménységmérő módszerrel (akusztikus és impact) sem korrelált jól a kapott Magness-Taylor-féle keménység. A frissen leszedett mintáknál a korreláció nagyon alacsony volt, de ez javult a tárolás előrehaladtával. A különböző fajták a keménységváltozásban is másként viselkedtek. A mért impact paraméterek közül a tartózkodási idő és a maximális erő és az addig tartó idő hányadosa valamivel jobban korrelált az Effegi keménységmérés eredményeivel, mint a másik két impact jellemző (a görbe aszimmetriája és az elnyelt energia). A kísérlet során vizsgálták, hogy a barack két oldalának mérése mennyire ad jó képet a gyümölcs egészéről. Megállapították, hogy az Effegi keménységmérő ezzel a két „szúrással” nem tükrözi megfelelőképpen az egész gyümölcs keménységét. A kutatók véleménye szerint az ütésvizsgálati és akusztikus módszer megfelelő képet nyújt a gyümölcs egészéről.

Nem értek egyet a kutatókkal abban, hogy az ütésvizsgálati keménységtényező az egész gyümölcscről adna információt, ez a módszer is csak a mért terület keménységét mutatja meg. Viszont egyetértek azzal, hogy az akusztikus módszer a barack globális keménységét tükrözi. A cikk felhívta a figyelmet arra, hogy az Effegi keménységmérőnek nagy a szórása és lokális tulajdonságot vizsgál. Az szerintem nem meglepő, hogy az impact és akusztikus tényezővel nem függ össze nagymértékben az Effegi keménység, mert mind a három módszer másfajta keménységet mér.



## Második elrendezés- az érzékelő ejtése a mintára

A másik mérési elrendezésnél az érzékelőt ejtik a mintára, vagy pedig egy erő vagy gyorsulásérzékelőt tartalmazó, kis tömegű kalapáccsal vagy közel állandó impulzusú ütés érdekében ingával ütik meg azt. Tehát az érzékelő mozog és a minta áll. Ekkor a mérési feltételek könnyebben szabályozhatóak (pl. az érintkezési pont), mint a szabadon eső termények esetében. Így a kapott jel független a termény tömegétől, kevésbé függ a minta alakjától és a kis energiájú ütközés miatt kíméletesebb. Ez az utóbbi fontos szempont, hiszen a mérést úgy szeretnénk végrehajtani, hogy a termény ne roncsolódjon a vizsgálat közben. Az elrendezés megvalósítása az érzékelő ejtésénél már nem könnyű feladat, ha mindig a termény felületéhez viszonyítva azonos magasságról szeretnénk ráejteni az érzékelőt.

Több kutatócsoport is vizsgálta az „új” technika alkalmasságát.

Correa és tsai (1992) az avokadó utóérését követték impact módszerrel. Abból indultak ki, hogy a gyümölcsbőr keménysége illetve puhasága indikátorként használható a gyümölcs érettségének meghatározására. A méréshez kis energiájú mechanikai impactort használtak, ami kb. 50 g-os. Az érzékelőt 4 cm-ről ejtették (szabadesés) a mintára és a gyorsulásérzékelő lassulását elemezték. A kísérlet során ezen felül mérték még roncsolásos (héjátszúrással) is az avokadó keménységét; ezen kívül számos fizikai és élettani vizsgálatot is végeztek (pl. hús-, héjszín és sűrűség meghatározás, etiléntermelés, légzésintenzitás mérése). Az ütésvizsgálati mérést egy mintán többször is elvégezték, és a kapott adatokból átlagot számoltak. Meghatározták az utóérés modelljét. Eredményeik alapján megállapították, hogy az ilyen technikával kapott impact változó használható a keménység alapján történő utóérés előrejelzésére. Ezzel a módszerrel lehetőség nyílik az egyenkénti gyümölcsosztályozásra és sokkal pontosabban előre jelezhető a keménységváltozás, mint a szúrással kapott keménységtényező segítségével. Továbbiakban felfigyeltek arra, hogy az utóérésnél van egy olyan érettségi állapot, ami után a keménység ugrásszerűen lecsökken. Ez egy olyan minőséggel összefüggő pont, ami az avokadó eladhatóságának végét jelzi. Ez után az időpont után, már túlért és öregszik a gyümölcs. Az öregedés során bekövetkező változásról már csak az ütésvizsgálati módszerrel mért, maximális erőig tartó idő adott információt, tehát ezt a jellemzőt érzékenyebbnek találták a roncsolásos méréshez képest.

Ebből a publikációból is kiderült, hogy az ütésvizsgálati módszer olyan változásokat is képes kimutatni, amiket már a „hagyományos” roncsolásos vizsgálat nem képes. Hasznos dolog, ha egy fajta gyümölcs érését modellezni tudjuk, hiszen így a minta puhulása, az eltarthatósága és megfelelő időben történő kitárolás előre jelezhető. Ám a modell létrehozásához rengeteg mérés szükséges. Egy minta eltarthatóságát nemcsak a tárolási körülmények befolyásolják, hanem a termény „élete” során ért különböző környezeti hatások (pl. öntözés mennyisége, napfényes órák száma, megfelelő

permetezés) és pillanatnyi állapota is (pl. érettségi fok, betegség megléte). Valószínű, hogy a kapott modellt csak az adott fajtára lehet használni, mert elképzelhető, hogy ugyanolyan fajhoz tartozó, de más fajtájú gyümölcs, zöldség eltérő ideig tárolható. Ha azonban ez a modell felállításra került, akkor lehetséges becsülni a minta jelenlegi érettségi állapotát illetve eltarthatóságát.

De Ketelaere és tsai (2001) paradicsom keménység alapján történő minősítéséhez használták az ütésvizsgálati módszert. Egy kemény paradicsomtételt választottak el a fogyasztó által nem kívánatos puha tételtől. Az általuk használt mérő-összeállítás egy forgócsapra szerelt gyorsulásérzékelőt tartalmazott, amit egy számítógép vezérelt. A megütési távolság állítható volt. A kutatók a mérésekhez a 2 cm-ről történő megütést választották. Minden paradicsomminta nyolc különböző pontján mérték a keménységet: 4-et az egyenlítő körül és kettőt-kettőt a talpán illetve a tetején. Referenciának hagyományos kompressziós módszert használtak. A minta megnyomása a megütésnél használt fejjel történt. A referencia módszer jól elkülönítette a különböző keménységű csoportokat. Jó korrelációt ( $r=0,84$ ) kaptak a referencia és az impact eredmények összehasonlításakor. Az impact módszer is képes volt a két csoport megkülönböztetésére. Vizsgálták mérés során azt, hogy a 8 mérési pont keménysége mennyire különbözik egymástól. Nem találtak nagy különbséget a különböző helyek megütésével kapott keménységtényezők között. Eredményeik alapján megállapították, hogy a roncsolásmentes ütésvizsgálati módszer eléggé pontos, hogy a paradicsomokat keménység alapján kategorizálja. Véleményük szerint a módszer jól reprodukálható és a többszöri mérésnek köszönhetően a minta egészéről ad információt.

Jarén és García-Pardó (2002) tanulmányt készítettek arra vonatkozóan, hogy melyik impact paraméter követi legjobban a posztharvest tárolás során bekövetkező változásokat. Ezen kívül adatbázist hoztak létre különböző fajtájú gyümölcsök (két alma és két körte) tárolása során bekövetkező változásairól, hogy ezek az információk alapját képezhessék egy on-line válogatórendszernek.

Az általuk használt ütésvizsgálati módszer során egy 50 g-os gyorsulásérzékelőt ejtettek körte esetében 4 cm-ről, alma esetében 3 cm-ről a mintára. Minden egyes gyümölcsöt két átellenes pontján ütötték meg. A kapott gyorsulási görbét az idő függvényében rögzítették. Ebből 11 impact paramétert számítottak ki.

A mérés során vizsgálták az összeállítás roncsolásmentességét. Tintával kenték be az érzékelőt és így jelölték meg az ütközés helyét. Két óráig hagyták állni a mintákat, majd a megütött területet sztereómikroszkóppal analizálták. Megállapították, hogy sem a körténél, sem az almánál nem okoz sérülést a mérés, tehát roncsolásmentes.

Kontrollként Magness-Taylor-féle keménységmérést végeztek a meghámozott minta két átellenes pontján. Szignifikáns különbséget találtak a minták keménységében a tárolási idő alatt (utóértek).

Továbbá mindkét gyümölcsfaj esetében hasonló trendet mutatott az ütésvizsgálati keménységtényező változása a tárolási idő függvényében. Ha a postharvest tárolás során bekövetkező utóérést három csoportba osztották, akkor a számolt impact paraméterek alapján a minták 100 %-osan kategorizálhatóak voltak. Ezt az eredményt akkor kapták, mikor a szétválasztáshoz mind a 11 impact paramétert bevonták. Ezeket a kísérleteket használták a válogató-szoftver „betanítására”, tehát létrehoztak –ezekre a fajtákra– egy olyan adatbázist, ami alapja lehet egy válogatósornak. Eredményeikből megállapították, hogy a rendszer –a 11 impact paraméterrel– alkalmas minden ilyen fajtájú gyümölcsről olyan jellemzést adni, ami alapján az érettségi osztályokba sorolható.

A fent említett publikációk megmutatták, hogy ez az összeállítás is képes az utóérés során bekövetkező változások kimutatására. A vizsgálat roncsolásmentes és érzékeny a keménységváltozásra.

A gyakorlati kísérletek mellett metodikai vizsgálatokat is végeztek a technika jobb és kíméletesebb használhatóságára.

Jarén és Ruiz-Altisent (1996) azt vizsgálták, hogy a két különböző sugarú ( $R_A=2,48$  cm,  $R_B=0,98$  cm), de ugyanolyan tömegű impact ütőfejek közül, melyik mennyire roncsolja a mintát. A mintákra mérés során 50 g-os érzékelőt ejtettek, amit a mérés előtt bekentek tintával, hogy megfigyelhessék a sérülés mértékét. A megütött pontokat sztereómikroszkóppal vizsgálták meg. Minden mintán négy ismétlést végeztek. Megállapították, hogy csak bizonyos határok között roncsolásmentes a módszer. 50 %-kal csökkent a sérülés mértéke, ha a nagyobb görbületű fejet használták.

Ezek után automatikusan felmerül a kérdés: Miért nem sík fejet használnak a méréshez? Erre is kapunk választ a publikációból. A sík felület használatát azért nem ajánlják, mert akkor a találkozási felület függ a termény görbületétől, ami növeli a mérés bizonytalanságát.

Véleményem szerint természetesen a nagyobb ütőfej kevésbé roncsol, mint az ugyanolyan tömegű kisebb fej, azonban ennek a nagy fejnek a mintával való találkozását is befolyásolja a minta görbülete. A roncsolásmentességet én a megütés erejének csökkentésével, vagy puhább ütőfej használatával biztosítanám. Ezért felmerül a kérdés, hogy

*Milyen előnyei és hátrányai vannak egy nem fémből, hanem puhább anyagból készült fejjel történő megütésnek, illetve milyen feltételek és beállítások mellett használható?*

P. Chen és tsai (1996) elméleti és gyakorlati kísérletekkel vizsgálták, hogyan függ az ütőtömegtől és az ejtési magasságtól a kapott impact jel. Ez azért lényeges kérdés, mert ha egy érzékelővel ütjük meg a mintát, akkor a megütést végző test tömege fontos paraméter, ami befolyásolja mind a megütésre kapott választ, mind a roncsolás mértékét. Az elméleti megközelítés szerint, ha az ütőfej

gömb alakú, akkor a megütés modellezhető úgy, mintha egy kemény gömb ütközne egy rugalmas gömbbel. Ilyenkor a kapott dinamikus válasz időben függ a minta rugalmassági tényezőjétől, Poisson arányától illetve a két test tömegétől, görbületétől és az egymáshoz viszonyított közelítési sebességtől. Ezek alapján vizsgálták, hogyan hat az ejtési magasság és a megütő tömeg a kapott impact keménységtényezőre. A kutatók a maximális gyorsulás és az addig tartó idő hányadosát használták keménységtényezőnek. Kiszámolták különböző tömegű fejjel milyen erő értéket kapnának, ha puha és kemény gyümölcsöt ütnek meg. Megállapították, hogy az ütőfej tömege nagy hatással van a kapott keménységtényezőre ( $A_{\max}/t_{\max}$ ). A puha és a kemény gyümölcs közötti elméleti különbség megháromszorozódik, ha kisebb tömegű fejet használnak. A gyakorlati bizonyításhoz körtétet ütöttek meg különböző tömegű (50 g, 20 g és 10 g-os) ütőfejekkel, különböző magasságból (2 és 4 cm-ről). Az ütőfejek átmérője azonos volt (19 mm). A különböző megütéseket (más magasság és más tömegű fej) a körte egyenlítője mentén, más-más pontokon végezték el, hogy az okozott sérüléseket a mérés után szemrevételezni tudják. A Magness-Taylor-féle mérést használták referenciaként. A minta megnyomását az ütésnél használt fejjel végezték el. Nagyobb különbséget kaptak a puha és kemény gyümölcsöt mérve, ha a kisebb tömegű ütőfejjel mértek. Ebből következik, hogy a keménységtényező érzékenyebb a változásra, ha könnyű fejet használnak a mérésekhez. Továbbiakban vizsgálták azt is, hogyan hat a maximális gyorsulásra az ütőfej tömege. Minél nagyobb volt a megütés impulzusa, annál nagyobb maximális értéket kaptak. Mivel a maximális gyorsulás az elsődleges mért paraméter a keménység meghatározásában, így a kutatók szerint elvárható, hogy a gyorsulási jele erős, könnyen detektálható és magasabb jel-zaj arányú legyen. Ezt csak könnyű fej használatával tudták biztosítani.

Ezen kívül vizsgálták, hogy mennyire befolyásolja a kapott jelet az, hogy a mintát kézben tartják vagy szabadon, befogás nélkül hagyják. Megfigyelték, hogy nagy tömegű ütőfej esetén nő a jel különbsége a különböző alátámasztások (befogások) esetén. Tehát méréseik alapján megállapították, hogy kisebb tömegű ütőfej esetében a kapott jelek közötti különbség kisebb, mint a nagyobb tömegű fej esetében. Ez fontos szempont válogatósor építésénél.

A kísérlet során megfigyelték, hogy a 10 g-os ütőfej sem 2 cm-ről, sem 4 cm-ről, és a 20 g-os 2 cm-ről egyik esetben sem okozott sérülést a mintán. Míg a 20 g-os 4 cm-ről az esetek 26 %-ában, az 50 g-os 2 cm-ről 32-53 %-ban, míg 4 cm-ről minden esetben roncsolta a megütött gyümölcsöt. Tehát mind az elméleti, mind a gyakorlati eredmények alapján megállapították, hogy az ütőfej tömegét a lehető legjobban minimalizálni kell. A minimalizálást több tényező is limitálja. (pl. a gyorsulásérzékelő tömege, a megütés sebességének kontrolálhatósága). A minimális tömeg kiválasztása során korlát az anyagi jellemző is. A megütési felületnek, a kutatók szerint, olyannak kell lennie, ami elég sebezhetetlen (kemény, ellenálló). Ez azért fontos, hogy az érzékelő fékeződése csak a minta rugalmasságából adódjon.

A megfelelő impact ütőfej tömege és a megütési távolság függ a kialakítástól (szabadon esős, lengőkaros) és a termény típusától is. Általános megközelítése a kutatóknak, hogy a cél az alacsony tömeg és a nagy sebesség. Ajánlják a további ilyen módszerrel mérő műszer, válogatósor tervezésénél, hogy a mintát állandó sebességgel üssék meg; az ütőtömeget addig csökkentse, amíg az ütőfej sebessége kontrolálható; a fej anyaga sérthetetlen legyen és végül az impact sebességet addig növeljék amíg az nem roncsol. Az érzékelő minimális tömegének 2 g-ot adtak meg.

A publikáció nagyon fontos, hiszen rávilágított arra, hogy a sérülés elkerülése érdekében figyelmet kell arra fordítani milyen tömegű érzékelővel, milyen sebességgel üjtük meg a mintát.

### **Melyik elrendezés a jobb?**

Moltó és tsai véleményüket 1996-os publikációjukban fejtették ki. A kutatók mindkét technikával vizsgálták mennyire különíthető el a felpuffadt mandarin a nem puffadtól, a tárolt a frisstől, a puha barack a keménytől, illetve mennyire mutat összefüggést a két technikával kapott keménységtényező a mandarin színével (zöld-narancs arány). Mindkét műszernél 1 cm-t esett a gyümölcs az érzékelőre, illetve az érzékelő a gyümölcsre. Mindkét esetben szabadesésről volt szó és egyetlen ejtést végeztek mintánként, mert megfigyelték, hogy a minta homogén, így bármely pont megütésével az egész gyümölcstről kapnak információt. Valószínű ezért nem esik szó a megütés helyéről; azt sem osztják meg az olvasóval, hogy mely paraméter alapján kapták eredményeiket.

Kutatásaik szerint az első technikával (gyümölcs ejtése) több, mint 80 %-ban, míg a másikkal több, mint 70 %-ban tudták szétválasztani a puffadt mandarin a nem puffadtól. A tárolt mandarinokat a frisstől az előbbi, gyümölcssejtéses technikával 86 %-ban, míg az utóbbival 97 %-ban tudták elkülöníteni. A különböző keménységű barackok szétválasztása 86 %-ban (első összeállítás), illetve 90 %-ban (érezkelő ejtése) volt sikeres.

A szín és a keménység összefüggésének vizsgálatánál a gyümölcssejtéses összeállítás nem adott jó eredményt, viszont a második technikával kapott eredményekre támaszkodva a nagyon zöld mintákat 81 %-ban, az alig zöld gyümölcsöket 100 %-ban és a narancsszínű mandarinokat, pedig 96 %-ban válogatták szét helyesen. Ezzel megállapították, hogy a mandarin színe és keménysége között összefüggés van, ami lehetőséget teremt a színérzékelő helyettesítésére is. Megállapították, hogy egyik technikával sem roncsolják ilyen beállítások mellett a mintát. Tehát a vizsgált szétválogatásoknál –a szín és keménység közötti összefüggés kivételével- mindkét típusú összeállítással hasonló jó eredményeket kaptak.

Az idézett publikáció következtetései noha csak egy fajra vonatkoznak, véleményem szerint általában is elmondható, hogy a második technika (az érzékelő ejtése) pontosabb képet ad a minta

keménységéről, állapotáról, mivel nem befolyásolja a kapott eredményt a minta tömege. A minta görbülete azonban mind a két technikánál befolyásolhatja a kapott keménységtényezőt.

### **2.2.2 Keménységmérő műszerek**

Miután többen is megerősítették, hogy az ütésvizsgálati módszer alkalmas a minták keménység szerinti szétválasztására, megépültek az ezen a módszeren alapuló berendezések is.

Diezma és tsai is terveztek impact keménységmérő berendezést. 2000-ben írt cikkükben a prototípus (verzió1) következő, javított változatát mutatták be. A méréshez szabadon eső, gyorsulásérzékelőt tartalmazó testet használtak (50,4 g). Az ejtési magasság állítható volt. A szoftver több paramétert is mutat, mint a változó gyorsulást az idő függvényében, sebességet, deformációt, elnyelt energiát. A műszert gyümölcsökkel (alma, sárgabarack, barack és körte) és különböző keménységű modellanyagokkal tesztelték. A tesztek azt mutatták, hogy a különböző keménységű biológiai és nem biológiai anyagok jól elkülöníthetők egymástól, de még a javított verzióval kapott eredményeknek is nagy volt a szórásuk. Ezért a jövőben az ismételhetőség megvalósítását tűzték ki célul.

Ez az impact műszer, bár elkülöníti a különböző keménységű anyagokat, de a nagy szórás hátrányt jelent. A különböző minőségi kategóriába való sorolást nagyon megnehezíti, ha valamely egyed az egyik kategória alsó vagy felső határán helyezkedik el.

#### **BerryBounce**

Patel és mtsai (1993) kis méretű gyümölcsök (feketeáfonya, málna) mérésére fejlesztettek műszert (BerryBounce). Céljuk e gyümölcs típusok keménységének mérésére elterjedt rugós erőmérős vagy kompressziós módszer kiváltása volt. Mindkét hagyományos módszernél a bogyó valamely hányadáig történő összenyomáshoz szükséges erőt mérik. Ezek munkaigényes, roncsolásos, ezért nem ismételhető mérések. Az általuk kifejlesztett technika gyors, roncsolásmentes és nagy számú minta mérésére alkalmas.

A BerryBounce-szal való mérés során a bogyókat kis távolságból (30 mm-ről) egy erőérzékelőre ejtik. A kapott erőgörbe idő-alapú változását figyelték. A jellemző paraméternek a görbe lecsengési idejét választották, ami fordítottan arányos a keménységgel. Tehát minél kisebb ez az idő, annál keményebb a bogyó. Az erőérzékelő egy polimer fóliába van beépítve, így nem egy kemény anyagra esnek a bogyók, ezért nem károsodnak. Azért, hogy a gyümölcs csak egyszer essen az érzékelőre a polimer fóliát 45°-os szögben helyezték el a szállítószalaghoz képest, így a gyümölcs a mérés után „elpattan” róla. A kutatók nem tartották fontosnak, hogy minden egyes gyümölcs keménységét megmérjék, amennyiben a tételből vett nagyszámú minta reprezentatív volt. A bogyókat nem pozícionálták és a minta haladási sebességét sem szabályozták. Az erőérzékelőt egy

számítógéppel kapcsolták össze. Az ehhez fejlesztett szoftver segítségével az adatok azonnali megjelenítésére nyílt lehetőség. Az adatgyűjtés végén a program kiszámolta a mért adatok átlagát és szórását, és megmutatta a lemért bogyók számát.

Megfigyelték, hogy a görbe lecsengési ideje és a bogyó tömege között mérsékelt összefüggés van. Ezért korrigálták a kapott adatokat a következő módon: korrigált lecsengési idő = lecsengési idő/ a bogyó tömege<sup>1/3</sup>. Fekete áfonyával és málnával tesztelték a műszert. Mindkét gyümölcsfajból származó minták keménységét a roncsolásmentes vizsgálat után a roncsolásos Ametek erőmérővel is megmérték.

Két málnafajtát vizsgáltak két különböző érettségi kategóriában. A BerryBounce egyértelműen el tudta különíteni egymástól a két különböző érettségi osztályt mindkét fajtánál.

Az áfonyánál három fajtát, két keménységi (érettségi) kategóriát vizsgáltak. A roncsolásos méréshez a teszt előtt az áfonyákat méret szerint csoportosítani kellett, hogy a bogyókat átmérőjük kb. 20 %-áig nyomja össze a műszer. A BerryBounce-szal az áfonyánál is sikeres volt a kemény és puha csoportok közötti szétválasztás.

Ezek után végeztek olyan kísérletet, amikor különböző százalékokban (0, 10, 25, 50, 75, 100 %-ban) kevertek puha bogyókat a kemények közé. Ezen csoportok beazonosítása sem okozott gondot az új műszernek. Minden BerryBounce-szal elvégzett mérés jól korrelált az Ametek erőmérő eredményeivel. Ezzel bebizonyították, hogy a műszer hatékony eszköz a kis tömegű gyümölcsök keménységének mérésére. Mind a hagyományos, mind az új műszer hasonló pontossággal dolgozott, de míg az Ametek-vel 20-30 másodpercig tartott egy bogyó mérési ideje, addig ez a BerryBounce-szal csak kb. egy másodpercig, ráadásul az eredményt is azonnal kijelezte, és nem igényelte a méret szerinti előválogatást.

A kifejlesztett technika előnye, hogy a nagy érzékenységgű érzékelő miatt a kis tömegű gyümölcsök mérésére is lehetőséget nyújt. A rendszer egyszerűen kivitelezhető, azonban csak a tétel keménységének becslésére alkalmas, mivel figyelmen kívül hagyták a gyümölcs alakjának (görbületének) és pozíciójának hatását a kapott keménységtényezőre, azonban a tömeggel korrigálták a kapott keménységet. Hátránya, hogy nem hordozható és a pozícionálás hiánya miatt száraz, kis tömegű gyümölcsök (cseresznye, meggy, eper) mérésére nem alkalmas.

#### Sinclair IQ

Ez egy, a Sinclair International Ltd. által fejlesztett impact mérőrendszer (2. ábra). A szabadalmazott berendezésükben egy kis tömegű erőérzékelőt helyeztek el egy speciális, sűrített levegős működtetésű fújtató végére és a minta megütése ezzel a fújtatóval történik. Az erőérzékelő által mért impact jel időbeli változását rögzítik. A válaszként kapott görbe csúcsa (amplitúdója) és időtartama (maximális erőig tartó idő) függ a minta keménységétől. Egy kemény mintánál nagy az

amplitúdó és az addig tartó idő kicsi, egy puha gyümölcsnél ez pont fordított, az amplitúdó alacsony és a hozzá tartozó idő nagy. A kapott válaszgöréből számítják ki a mintára jellemző belső minőségi indexet (Internal Quality index, azaz IQ), ami a következő:

$$C \cdot (P_{\max} / \int p(t) dt)^2, \quad (2.3)$$

ahol a C a rendszerre jellemző konstans,  $P_{\max}$  a maximális erő és  $p(t)$  az impact erő az idő függvényében. A levegő nyomása 15 cm vízoszlop nyomásnak felel meg, és az érzékelő a minta felett 15-35 mm-re található, így a mérés nem okoz semmiféle sérülést a gyümölcsön. A Sinclair IQ-val elvégzett mérések jó reprodukálhatóságot mutattak. (Shmulevich et. al (2003))

Shmulevich és mtsai (2002, 2003) méréseket végeztek, hogy összehasonlítsák az új berendezéssel és az eddig használt „kalapácsos” impact módszerrel kapott eredményeket. Ehhez különböző keménységű gumilabdákat használtak. Megállapították, hogy a két módszerrel kapott jel nagyon hasonló ( $R=0,993$ ). Ezután vizsgálták a különböző módon számított keménységtényezők (új, azaz az IQ (2.3), régi, azaz C1 (2.1) és C2 (2.2)) és a kvázi-statisztikus



**2. ábra:** Sinclair IQ™ keménységmérő (on-line)

kompressziós tesztel mért rugalmassági tényező közötti összefüggést. Mindhárom paraméter esetében lineáris összefüggést kaptak.

A rendszert a gumilabdák után almával is tesztelték. A mért rugalmassági tényező Golden Delicious esetében valamivel jobb összefüggést mutatott az új ( $R=0,911$ ), mint az eddig használt C1 és C2 ( $R=0,890$ ;  $R=0,901$ ) impact jellemzővel. Ezzel szemben a Starking Delicious és Granny Smith almafajtáknál a roncsolásosan mért rugalmassági tényező és az IQ paraméter közötti összefüggés sokkal jobbnak bizonyult (Starking Delicious:  $R=0,837$ ; Granny Smith:  $R=0,820$ ) a roncsolásosan mért rugalmassági tényező és C1 közötti, illetve a roncsolásosan mért rugalmassági tényező és a C2 impact jellemző közötti összefüggésnél (Starking Delicious:  $R=0,323$  és  $R=0,539$ ; Granny Smith:  $R=0,609$  és  $R=0,693$ ).

A mérés során arra a következtetésre jutottak, hogy a C1 és C2 –ellentétben az IQ paraméterrel– erősen függ a csúcstól (amplitúdótól) ( $C1=F_{\max}/T_{\max}$ ,  $C2=F_{\max}/T_{\max}^2$ ). A kapott csúcs, pedig szoros kapcsolatban áll a mintát megütő tömeg (kalapács) sebességével, ezért elégtelen mérési körülmények között ezekkel a paraméterekkel kapott keménységtényező hamis képet adhat a minta keménységéről. Ezért inkább a kevésbé érzékeny IQ paramétert javasolják a szerzők további használatra.

A Sinclair International Ltd. kifejlesztett egy újabb megütési módot, ami eltér az eddig használt egyszerű ejtéstől és a kalapácsra, ingára szerelt érzékelővel való megütéstől. Véleményem szerint a Sinclair által kifejlesztett technikánál nemcsak a megütési mód az érdekes, hanem az új impact



paraméter is. Az eddig használt C1 és C2 paraméterekhez képest ez a jellemző kevésbé érzékeny a mérési körülményekre, ezért jobban felhasználható kevésbé definiált környezetben (pl. válogatósor építésénél) is.

### 2.2.3 Minősítő- és válogatósorok

A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy az ütésvizsgálati módszer alapja lehet egy automatikus keménységválogató rendszernek, azonban a válogatósornak a laborból az iparba történő kikerüléséig a kutatóknak számos problémát meg kell oldaniuk.

#### SoftSort

McGlone és tsai (1998) az impact módszert használták fel válogatósoruk (SoftSort) tervezéséhez. Céljuk a kézi válogatás kiváltása volt. A SoftSort roncsolásmentes gyümölcsosztályozó gép, melynek alapelve, hogy a gyümölcs „pattanása” összefügg annak keménységével. Mivel előzetes vizsgálataik során megállapították, hogy sok problémát okoz a gyümölcs kezelése, pozícionálása a mérés előtt, ezért úgy döntöttek, hogy ezen nehézségek kiküszöbölése érdekében csak gömbszerű, nagyjából homogén mintákat osztályoznak.

Mérésük során kivi tételből válogatták ki a puha egyedeket. Az osztályozás úgy történt, hogy a dobozból a szállítószalagra rakták a mintákat. Ekkor kézzel kiválogatták a „rossz kinézetű”, külső hibákkal rendelkező kiviket. Majd a minták egyesével egy csúszdán keresztül az erőérzékelőre estek. A kapott jelből a számítógép megállapította kemény-e vagy puha a mért minta. Ha puhának határozta meg, akkor kilöködött a minta egy ládába, ha keménynek, akkor a szállítószalag végén egy dobozba került. A minták keménység szerinti minősítéséhez felhasznált impact paraméter az amplitúdó félmagasságához tartozó görbeszélesség volt az erő-idő görbén. Ebből a keménységet a következő módon számították ki:  $E=42,7/td^{1/2}$ , ahol a  $td$  az előbb említett impact paraméter, a 42,7 pedig egy elméleti érték, ha feltételezik, hogy az átlag kivi 100 g és 20 mm sugarú. Mivel megfigyelték, hogy a  $td$  -így a kapott keménység is- érzékeny a különböző tömegekre, ezért a pontos osztályozáshoz a mérés előtt a gyümölcsöt méret alapján osztályozniuk kellett. Ezek után már az egyes csoportokon belüli méret/tömeg különbségek elhanyagolhatók voltak. Meg kell jegyezni, hogy a kereskedelmi forgalomba kikerülő kivit méret szerint kell csomagolni.

A válogatósorról kapott eredményt összehasonlították a kézi válogatás és a penetrométeres méréssel kapott adatokkal. Megállapították, hogy viszonylag jó ( $R^2=0,47-0,83$ ) a korreláció a penetrométerrel kapott eredmény és a válogatás eredménye között. A kézi osztályozás 96 %-át válogatta ki a puha gyümölcsöknek, míg a SoftSort 93 %-át; és mind a kézi, mind a gépi válogatás 8 %-ot hibázott, tehát 8 % kemény kivit sorolt a puha minták közé. Megállapították, hogy a gépi válogatás pontossága elég jól megközelíti a kéziét, ezért kereskedelembe használható a műszer.

Megállapítható, hogy gyorsan és egyszerűen megoldották a pozicionálás problémáját. Az általuk tervezett válogatósor, így sem helyettesíti az emberi erőt, hiszen a mérés előtt ki kell válogatni a külső hibákkal rendelkező mintákat, mert ezt az osztályozó nem tudja megtenni. A másik hátránya, hogy a kapott impact jellemző a tömegtől/mérettől függ, ezért mérés előtt osztályozni kell a gyümölcsöket. Ha teljesen gépesíteni szeretnék a folyamatot, akkor egy látórendszeres vizsgálattal elvégezhető a külső hibák azonosítása, a tömeg szerinti osztályozás, pedig egy erőérzékelő beépítésével kiváltható.

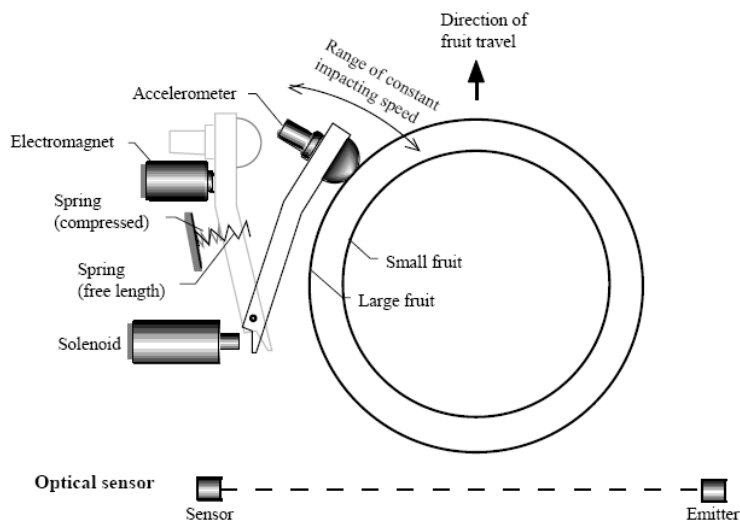
Készültek olyan impact válogatósorok, amelyek nem a minta érzékelőre ejtéséből nyerik az ütésvizsgálati görbét, hanem egy inga megütéséből. Válogatósor építéséhez a minta ejtési technikával szemben azért előnyös ez az összeállítás, mert a kapott impact görbe így nem függ a minta tömegétől, és kevésbé van hatással rá az objektum görbülete. Ez a két tényezőtől adódó variabilitás nagy hatással van a mérés pontosságára. Másik nagy hiányossága a mintaejtési technikának, hogy a mérés sebességét korlátozza az, hogy a minta szabadon esik, ezen kívül nehezen szabályozható a minta megütésének helye.

Két nagy kutatócsoport, a kaliforniai P. Chen és a spanyol García-Ramos, Ortiz-Canavate és Ruiz-Altisent vezetésével hasonló válogatósort készítettek. Ennek oka valószínűleg a közös kezdet, hiszen 1996-ban közös cikket publikáltak. Chen és Ruiz-Altisent (1996a) szerint a fent említetteken kívül az ingás megütésből még számos más előny is adódik: növelhető a mért gyorsulási jel erőssége, ami elősegíti a jel könnyebb detektálását és maximalizálja a jel-zaj arányt; ezzel növelhető a számolt keménységtényező nagysága, ezért a keménységváltozás is érzékenyebben kimutatható; minimalizálja a gyümölcs ütés

során bekövetkező elmozdulásából eredő hibát; csökken az ütestől keletkező sérülés, és végül elősegíti a nagysebességű érzékelést.

Mindkét válogatósor lelke egy gyorsulásérzékelőt tartalmazó megütő kar, amit egy elektromágnes működtet (3. ábra).

A kistömegű érzékelőn kívül a válogatógép tartalmaz egy optikai érzékelőt a gyümölcs helyzetének meghatározására, egy kilövő rendszert és egy szállítószalagot. A minta a szállítószalagon érkezik,



**3. ábra:** A válogatósorban lévő impact érzékelő

meghatározására, egy kilövő rendszert és egy szállítószalagot. A minta a szállítószalagon érkezik,

az optikai érzékelő észleli a gyümölcs jelenlétét, jelet küld a számítógépnek, a számítógép aktiválja az impact érzékelőt, ami begyűjti és elemzi az impact adatokat és meghatározza a gyümölcs keménységét. Mindkét válogatósornál az adatok „beszerzése” és értékelése szinte azonos időben megtörténik (real-time), ennek alapján a számítógép parancsot küld a kiválasztó rendszernek, amely az értéknek megfelelő kijárat felé irányítja a gyümölcsöt. Mindkét kutatócsoport 3 kijáratot tervezett a géphez, így a puha, közepes és kemény minták elkülönítése vált lehetségessé.

Mérés során számos problémával kellett megbirkózniuk. Először is megvizsgálták, hogy milyen a megfelelő impact érzékelő. Arra jutottak, hogy az a jó érzékelő, ami kistömegű, nagy sebességű megütésre képes, közel állandó sebességgel mozog, ellenálló szerkezetű és egy erős, jól detektálható jelet ad, ahol nagy a jel-zaj arány.

Újabb kérdést kellett megvizsgálniuk, hogy vajon az eddig -laborban mért- befogott (kézben vagy valami fogóval tartott) minta megütése során kapott keménységtényező mennyivel változik abban az esetben, ha a terményt befogás nélkül (sík felületre helyezve) vizsgálják. Azt kapták eredményül, hogy a kapott jelet nem befolyásolja, hogy befogott vagy nem befogott állapotban vizsgálják a mintát. Tehát így akadálytalanul vizsgálhatják a mintákat szállítószalagon is.

Gondot okozott az is, hogy milyen távolságra legyen a minta a kartól, illetve az egyes elhelyezkedésből, és nagyságból adódó távolságkülönbségek milyen befolyással vannak a kapott impact görbére. Ezért a kart úgy tervezték meg, hogy egy adott tartományon belül nagyjából állandó legyen a sebessége. Megmérték azt is, hogy egy tartományon belül –jelen esetben ez 8-23 mm között- nincs hatással a kapott jelre az, hogy milyen messze lendül a kar a mintával történő találkozás előtt.

Utolsó lépésben összehasonlították a referencia (peneterométeres) méréssel a kapott keménységtényezőt. Vizsgálataik során barackot és kivit mértek. Jobb összefüggést kaptak, ha nem a maximális erőt (Magness-Taylor-féle), hanem a Young modulust korreláltatták az impact keménységtényezővel, jelen esetben a maximális csúcs osztva az addig eltelt idővel. Továbbá megállapították, hogy az impact módszer érzékenyebb a keménységváltozásra puha gyümölcsök esetében, mint a kompressziós módszer.

Ez után a publikáció után külön dolgozott a két csoport.

P. Chen és Tjan (1998) célja a válogatósor sebességének növelése volt. Ennek érdekében vizsgálták a válogató folyamat minden lépésének időigényét. A lépések a következők: adatgyűjtés, adatelemzés, adatrögzítés, impact paraméterről fájl készítése, a nyers adatok rögzítése, grafikus megjelenítés. Így 205 ms-ig tartott egy minta lemérése és értékelése. A folyamat gyorsítása érdekében nem rögzítették a nyers adatokat és nem jelenítették meg grafikusan az eredményeket, így a teljes időszükségletet 100 ms alá szorították, ami a kiegészítő műveletekkel együtt

6db/másodperces sebességet jelentett. A válogatósort barackokkal tesztelték, amelyeket a jobb válogatás érdekében mérés előtt pozícionáltak.

Ortiz-Canavate, García-Ramos és tsai (2001, 2003) más irányú kutatást végeztek, ahol számos problémával szembesültek. A modell anyagokat (tenisz-, parafa- és gumilabda) sikeres elkülönítése után gyümölcsökön (alma, őszibarack, nektarin) is tesztelték a válogatósort. A laborban történő méréseket (Magness-Taylor-féle, terhelés-tehermentesítéses és impact) tekintették referenciának.

Megfigyelték, hogy a válogatósossal kapott eredményeknek nagyobb volt a variabilitása, mint a laborban elvégzett méréseknek. Ezért a variabilitás forrását vizsgálták. Eredményeik azt mutatták, hogy az optikai érzékelő pozíciója, a gyümölcs helyzete, a megütött impact terület, a megütés sebessége mind-mind hatással vannak a kapott impact jelre. További forrása a variabilitásnak az, hogy mind a minta, mind a kar mozgásban van mérés közben. A válogatásnál kapott impact paramétert érzékenynek találták a gyümölcs alakjára, a megütés szögére és a gyümölcs görbületére. Jobb eredményt kaptak, ha a vizsgált gyümölcsök átlagos alakúak és hasonló méretűek voltak. Különböző eredményt kaptak, ha egy gyümölcs különböző pontját ütötték meg, ami az alak egyenetlenségéből és az inhomogenitásból adódott. A szétválogatás mértéke javult, ha minták széles keménységi tartományból származtak.

Azt is megállapították, hogy a baracknál a külső epidermisz réteg nem befolyásolja a mérést, míg az érzékelőre történő viasz felhalmozódás gondot okozhat a jel érzékelésében.

Az impact paraméter, kompressziós módszerekkel mért eredményekkel összehasonlítva, a legjobb korrelációt a terhelés-tehermentesítési szakasz maximális erejével mutatta, 2,5 mm-es deformáció vagy 3 N-os terhelésnél mellett. Ezen kívül eredményeik azt mutatták, hogy a Magness-Taylor-féle mérés a nagyon puha (<5 N) gyümölcsök között nem tud különbséget tenni, míg az impact mérés igen; viszont az impact módszer a nagyon kemény mintákat nem tudta osztályozni.

Homer, Ortiz-Canavate és társai (2002) következő publikációjukban, az előbbieken felsoroltak mellett a kilőkő rendszer problémáival is meg kellett küzdeniük. A kilőkő rendszer várólista alapján dolgozik, és hibát okozhat az, ha a gyümölcs nem olyan sorrendben ér a kilőkő rendszerhez, mint amilyen sorrendben le lett mérve. A sorrendben az esetleges változás akkor következik be, ha a kilőkő rendszer optikai érzékelője nem érzékeli a terményt, vagy kétszer méri le ugyanazt a mintát az érzékelő, így egy nem létező minta is bekerül a sorba.

A probléma megoldását a minták valamilyenféle kódolásában látják. Ezen kívül még gondot okozott a kart és a mérőrendszert összekötő kábel csavarodása is. A kísérletből megállapították, hogy ez a rendszer, ezekkel a hibákkal nem ad magas szintű válogatást.

Az előbb bemutatott kísérletekből is látszik, hogy számos problémát vetett fel a válogatósor tervezése, tesztelése, illetve az hogy milyen feltételeknek kell megfelelni az egyes részeknek. (pl.

ütőkar, érzékelő). Véleményem szerint a minta egyszeri megütése nem elég a keménység meghatározásához.

A Sinclair International Ltd. megalkotta a laborban használt verzióból az on-line válogatósort is. Sajnos a műszerről kevés a publikált információ. Azt azonban tudni lehet, hogy az általuk szabadalmaztatott technikát használják fel, és egy mintát négyszer ütnek meg. A válogatás sebessége 10 minta/másodperc.

#### **2.2.4 Betegség vizsgálata impact módszerrel**

Az impact módszer nemcsak keménység, érettség vizsgálatára alkalmas, hanem az azzal összefüggő tulajdonság (pl. lisztesség) jellemzésére is. A lisztesség (mealiness) vagy ahogy a baracknál nevezik gyapjasság (woolliness), a hidegtárolás során kialakuló szöveti rendellenesség. A gyümölcshús léhiány és egy lisztes, homokos állomány jellemzi. Ennek a rendellenességnek külső jelei nincsenek, tehát ránézésre minden rendben van; a fogyasztó csak a rágásnál észleli hogy a gyümölcshús lisztes.

Két kutatócsoport vizsgálta ezt a jelenséget, Arana és társai almán, őszibarackon és nektarinon, míg Ortiz és társai őszibarackon.

Arana és munkatársai (1998, 2004) és Salvadores és tsai (2000) több éven keresztül vizsgálták ezt a témakört. Publikációjukban olyan roncsolásmentes módszert kerestek, ami alkalmas a lisztesség kimutatására és a hibás gyümölcs kiválogatására. Ezzel a rendellenes gyümölcs nem kerülne a kereskedelmi forgalomba.

Többfajta roncsolásos vizsgálatot is elvégeztek (Magness-Taylor-féle keménységmérés, terhelés-tehermentesítési vizsgálat, tűvel való szűrés és nyírás), hogy összehasonlítsák a roncsolásmentes mérések eredményeivel. A roncsolásmentes módszernek az ütésvizsgálati módszert találták a legmegfelelőbbnek. A mérésnél egy érzékelőt ejtettek alma esetében 2 cm, 5 cm és 8 cm-ről, míg őszibarack és nektarin esetében 5 cm, 8 cm és 10 cm-ről. A kísérletet kiegészítették érzékszervi vizsgálatokkal is.

Mindhárom cikkükben korrelációt találtak az impact paraméterek és a lisztesség, gyapjasság között. A 1998-os publikációjukban az alma esetében a leginformatívabb jellemzőnek a görbe lecsengési idejét találták, míg a barack és a nektarin esetében a görbe lecsengési ideje mellett a maximális deformáció is információt adott a gyapjasságról. A 2000-es és 2004-es közleményükben három illetve hat almafajtát vizsgáltak az előbb felsorolt módszerekkel. Az impact paraméterek közül a görbe lecsengési idejét, a maximális erőt, a maximális deformációt és a maradandó deformációt találták a legjobbnak a lisztesség előrejelzésére. Ezekkel a paraméterekkel 66,5-70 %-os volt a lisztes almák elválasztásának sikere az egészséges gyümölcsöktől. Megállapították, hogy azoknál a

fajtáknál eredményesebb az elválasztás, amelyek hajlamosabbak a lisztesség kialakulására. Mindhárom cikk végső következtetése az volt, hogy lehetséges a roncsolásmentes impact módszerrel az alma, őszibarack és nektarin lisztességét, illetve gypjasságát jellemezni.

Mivel az ütésvizsgálati módszer felületi keménységet mér, ezért elég nehéz a klimaktérikus (utóérő) gyümölcsök esetében a puhulási (érés) folyamatokat megkülönböztetni a lisztessedési folyamattól. Ezért, véleményem szerint, ahhoz, hogy ez a módszer megbízhatóan használható legyen ennek a rendellenességnek a kimutatására, rengeteg vizsgálatot kell elvégezni. Növeli a szükséges vizsgálatok számát az, hogy nem csak a tárolási körülménytől függ a kialakulása, hanem fajtától is.

Ortiz és társai (2001) szintén azt tűzték ki célul, hogy az őszibarack gypjasságát roncsolásmentes módszerekkel kimutassák. A kutatók két roncsolásmentes módszert kombináltak a NIR (Near-infrared spectroscopy) és az impact módszert. Referenciaként ők is roncsolásos méréseket (Magness-Taylor-féle keménységmérés, kompressziós mérés és nyírás) végeztek.

A vizsgálatnál azt használták ki, hogy a gypjas barack puha állományú és kevés levet tartalmaz. Kétlépcsős osztályozást dolgoztak ki. Az első lépésben keménység alapján osztályoztak. A roncsolásmentes összeállításban ezt az ütésvizsgálati módszerrel végezték, míg a roncsolásosnál a Magness-Taylor-féle keménységmérés töltötte be ezt a szerepet. Ekkor két kategóriára osztották az őszibarackokat, keményre és puhára. Ezután már csak a puha mintákat vizsgálták tovább, ahol a lé mennyiségét határozták meg. A roncsolásmentes méréseknél a NIR spektroszkóppal méterrel, míg a roncsolásosnál a nyírásos vizsgálattal végezték. Itt már három kategóriába sorolták a mintákat: magas, közepes és alacsony létartalmú. Ezek után azt a gyümölcsöt minősítették gypjasnak, amelyik puha és alacsony létartalmú volt.

Korrelációt mutattak ki a roncsolásos keménység vizsgálat és az impact paraméterek (maximális erő és maximális deformáció) között. Ezt a két ütésvizsgálati jellemzőt használták a keménység alapján történő szétválasztásra. A NIR spektroszkópiát és az impact módszert kombinálva a válogatásnál 80 %-os eredményt értek el.

Továbbiakban megállapították, hogy az impact paraméterek alkalmasak a minta szerkezeti jellemzőinek becslésére; és a NIR spektroszkópiával kombinálva érzékenyebben mutatható ki a gypjasság, mint a roncsolásos módszerekkel. Azonban a kutatók szerint az ütésvizsgálati módszer magában nem ad elég információt a gypjasság kimutatására.

Tetszett a kutatók ötlete (Döntési fa), miszerint két lépcsős osztályozást alkalmaztak. Jól kihasználták a gypjasság két legjellemzőbb fizikai tulajdonságait, miszerint puha állományú és léhiányos. Ezzel az osztályozással időt is spórolnak, hiszen már csak a puha gyümölcsök jutnak el a NIR spektroszkópiás vizsgálathoz.

### 2.2.5 Az ütésvizsgálati módszerrel kapcsolatos publikációk összefoglalása

Összefoglalva elmondható, hogy az ütésvizsgálati módszerrel kapott eredmények nagyon biztatóak, azonban az is nyilvánvaló, hogy még rengeteg megválaszolatlan kérdés van e témakörben.

A kutatók egyetértenek abban, hogy az ütésvizsgálati módszerrel a minta felületi keménységéről információt kaphatunk és nagyon sokféle zöldség, gyümölcs mérésére használható módszer. Abban is egyetértenek, hogy a módszer teljesen roncsolásmentes, azonban arra is láthattunk példát, hogy a nem megfelelő mérési beállítások mellett a mérés roncsolhatja a terményt. Tehát erre a mérés megtervezésekor nagy figyelmet kell fordítani.

Nincs egyezés viszont, az összeállítási mód használatát illetően. Úgy látszik azonban, hogy az elmúlt években főleg az érzékelő-ejtéses technikát használták a kutatók a kísérleteikhez. Ennek oka abban kereshető, hogy könnyebb az érzékelő pozicionálása, kíméletesebb megütést eredményez és a minta tömegének nincs hatása a kapott jelre. Abban sem azonos a kutatók véleménye, hogy az impact görbe mely paramétere alapján számítsák ki az ütésvizsgálati keménységtényezőt. Úgy látszik körvonalazódni, hogy a frekvencia alapú változásokkal szemben –aminek értékére a minta mérete közepes hatással van- az időben történő változást részesítik előnyben. Megfigyelték azt, hogy a termény rugalmassági tényezője csökken az érés előrehaladtával (puhul), az időben változó ütésvizsgálati görbe maximális ereje/gyorsulása ennek megfelelően csökken, míg a kapott görbe első csúcsának lecsengési ideje egyre nő. Ellenben kemény termény esetén az ütésvizsgálati görbe amplitúdója megnő, viszont a görbe lecsengési ideje arányosan lecsökken. Ezért általában az időben változó görbe maximális erő illetve gyorsulási csúcsát, vagy az addig tartó időt, illetve az ezekből kiszámítható jellemzőket (pl. C1, C2, IQ paramétert) használják, mint ütésvizsgálati keménységtényezőt.

Az impact méréssel egyszerűen és gyorsan vizsgálhatjuk a termények felületi keménységét, de bármely összeállítási technikában rejlő probléma az, hogy csak a felület azon pontjáról ad információt, ami az érzékelővel találkozott. Mivel a kertészeti termények felületi variabilitása nagy, ezért nem elég csak egy pontját vizsgálni a terménynek, hanem több pont megütése szükséges ahhoz, hogy objektív képet kapjunk a terményről. Ahhoz, hogy a módszer referenciaként –a kompressziós módszer kiegészítéseként vagy kiváltásaként- elfogadható legyen, még rengeteg mérést kell elvégezni és a kutatóknak is közös álláspontra kell jutniuk. Nemcsak a mérési elrendezést, a mérési beállításokat kellene tisztázni, hanem egy (vagy kettő) keménységtényezőt kellene kiválasztaniuk a sokfajta általuk használt paraméterekből, ami a leginformatívabb, a legérzékenyebb a keménység változására, kevésbé érzékeny a minta méreteire és természetesen minden terményre használható jellemző. Azonban számos kísérletet el kell végezni ennek a megvalósításához.

Az irodalmi összefoglalás alapján a következő kérdések merülnek fel:

- Van-e és ha van milyen összefüggés található a „hagyományos”, referenciaként elfogadott módszerrel és az ütésvizsgálati módszerrel kapott keménységtényező között?
- Milyen előnyei és hátrányai vannak egy nem fémből, hanem puhább anyagból készült fejjel történő megütésnek, illetve milyen feltételek és beállítások mellett használható?

### 2.3 Akusztikus módszer

Ez a módszer mindenki számára ismert, hiszen a görögdinnye hagyományos érettségi vizsgálata is akusztikus elveken alapul. E vizsgálat során a dinnyét megkopogtatják az oldalán és hallgatják annak hangváltását.

Az akusztikus módszer azon a megfigyelésen alapszik, hogy a minta gerjesztésre adott válasza (hangja) összefüggésben van annak mechanikai tulajdonságaival. Az akusztikus mérés során a termény globális keménységéről kaphatunk információt. Számos zöldség és gyümölcs keménysége vizsgálható e technikával pl.: alma, őszibarack, sárgabarack, körte, narancs, mandarin, görögdinnye, sárgadinnye, paradicsom, hagyma és még hosszan sorolhatnánk. Egy dolgot azonban érdemes megfigyelni az imént felsorolt terményekkel kapcsolatosan, hogy van közös tulajdonságuk: mindegyik megközelítőleg gömb alakú és nagyjából homogén. Ez a tulajdonság bár elég gyakori a gyümölcsök körében és találhatunk néhány ilyen a zöldségeknél is, azonban nem fedi le a kertészeti termények teljes palettáját. Ezek tudatában felmerül a kérdés, hogy:

*Elképzeltető-e, hogy az akusztikus módszerrel a gömbtől lényegesen eltérő alakú kertészeti termények kerüljenek vizsgálatra? Ha igen, akkor milyen kísérleti elrendezésben és mennyire megbízható a kapott eredmény?*

Az akusztikus módszerrel elég régóta foglalkoznak, hiszen az első tudományos kísérletek már az 1940-es években elkezdődtek. Az első publikáció Clark és Mikelson (1942) nevéhez fűződik, akik megfigyelték azt, hogy a gyümölcs állományjellemzői összefüggnek annak vibrációs tulajdonságaival; és az egész termény természetes frekvenciája változik érés során.

Talán ennek a több tízéves kutatásnak is köszönhető az, hogy a kutatók között nincs akkora vita az akusztikus módszert, illetve az akusztikus keménységtényező számítását illetően, mint az ütésvizsgálati módszernél. Az akusztikus keménységtényező számításának módjával Abbott és tsai (1968) publikációjában találkozhatunk. A kutatók, a száránál felfüggesztett alma rezgéseit vizsgálták. A 20-2400 Hz-es tartományban 4 rezonancia frekvenciát detektáltak, amiből a másodikat ( $f_2$ ) tartották a legfontosabbnak, a leginformatívabbnak és a legjobban reprodukálhatónak. Megfigyelték, hogy a minta puhulása, sérülése, és a magháztörés jelenléte is hatással van a második rezonancia frekvenciacsúcsra. Az előbb említett okok miatt ezt a frekvencia



csúcsot használták fel az akusztikus keménységtényező kialakításakor. Azt tapasztalták azonban, hogy a termény rezonancia frekvenciája nemcsak a minta állományától függ, hanem annak alakjától és méretétől is. Ezért ennek korrigálása érdekében az akusztikus keménységtényezőt a következő módon alakították ki:  $S=f^2*m$ , ahol az  $f$  a második rezonancia frekvencia, az  $m$  pedig a minta tömege. Az így kifejlesztett keménységtényező jó korrelált a gyümölcsbőr rugalmassági tényezőjével, csökkent az alma öregedésével, illetve érésével, tehát egy megfelelő mérőszám lehet az alma minősítésére.

Néhány évvel később Cook (1972) a gyümölcsök, zöldségek rezonanciás viselkedését kutatták és tanulmányt folytatottak az akusztikus keménységtényező elméleti alapjainak megismeréséhez. Megállapították, hogy az Abbott által használt akusztikus keménységtényező még mindig valamennyire függ a minta tömegétől. Elméleti összefüggések alapján az  $f^2*m^{2/3}*\rho^{1/3}$  összefüggést, egyszerűen  $f^2*m^{2/3}$ -on használatát javasolták, ahol az  $f$  az első rezonancia frekvencia, az  $m$  pedig a minta tömege és a  $\rho$  a termény sűrűsége.

Látható, hogy a két kutatócsoport más-más rezonancia frekvenciával számítja ki a keménységtényezőt. *Vajon melyik keménységtényező használata a megfelelő?*

A kérdés egy részére Chen és De Baerdemaeker (1993) vizsgálataiból kapunk választ. A kutatók számítógépes szimuláció segítségével vizsgálták a legalacsonyabb gömb mód ( $f_1$ ) és a legalacsonyabb torziós mód ( $f_2$ ) rezonancia frekvenciájának és a termény keménységének kapcsolatát. Megállapították, hogy mind az első, mind a második rezonancia frekvencia nagymértékben összefügg a minta keménységével, így a keménységtényező számításához bármelyik frekvenciaérték felhasználható.

H. Chen és tsai (1993, 1996) végeselem módszer segítségével vizsgálták meg, mely akusztikus keménységtényező alkalmazása a legmegfelelőbb. A tömeg változásának hatását elemezték, ugyanis a két számítási módszer ebben különbözik a legjobban. Abból indultak ki, hogy a tömegváltozás, vagy a sűrűség-, vagy a mértváltozásnak köszönhető. Az első végeselem szimulációban a minta tömege a sűrűség miatt változott. Ekkor a tömeg és a rezonancia frekvencia közötti kapcsolat négyzetes volt. A következő szimulációban a minta tömegét méreteinek arányos változtatásával módosították. Ekkor a tömeg és a rezonancia frekvencia közötti összefüggés köbös volt.

Abbott és tsai (1997) szerint az  $f^2*m^{2/3}$  segítségével számított akusztikus keménységtényező pontosabb előrejelzést ad, amikor a termények méretei közötti különbség nagyon nagy. Viszont ha a méretkülönbség kicsi az új keménységtényező előnye nem szignifikáns.

A kutatók rávilágítottak arra, hogy a tömeg hatása különböző a rezonancia frekvenciára aszerint, hogy a tömegváltozást a sűrűség-, vagy a méretváltozás okozza. Ha az  $f^2 \cdot m$ -es összefüggést használjuk, akkor mellőzzük a minta méreteinek hatását, tehát a használata akkor ajánlatos, ha a minták közel azonos mérettartományban vannak, különben a korrekt méréshez méret szerinti előválogatás szükséges. A javított akusztikus keménységtényező alkalmazásakor mellőzzük a különböző sűrűségéből eredő hatásokat, azonban a méretkülönbségekből eredő változások kiküszöbölhetők.

A kutatók nagy része a fent említett két akusztikus keménységtényező valamelyikét használja a minta állományának jellemzésére.

Fontos kérdés az akusztikus módszer vizsgálatánál is, hogy  *mennyire jelzi előre az ezzel a módszerrel kapott mérési eredmény, a Magness-Taylor-féle keménységmérési értéket.* Ezért számos mérést végeztek az összefüggés megállapítására. Az eredmények, úgy mint az ütésvizsgálati módszernél, itt is változók. Számos publikáció eredményeit mutatja be a 3. táblázat a Magness-Taylor-féle keménység és az akusztikus módszerrel mért keménység összehasonlítására vonatkozóan.

**3. táblázat:** Az akusztikus módszerrel és a Magness-Taylor-féle méréssel kapott keménységek korrelációja

Termény	R <sup>2</sup> vagy R	Publikáció
alma (Ace Red Delicious)	R=0,42-0,57	Abbott et al. (1995)
alma (Cox)	R <sup>2</sup> = 0,96-0,98	De Belie et al. (2000)
alma (Delicious)	R=0,64	Abbott et al. (1992)
alma (Delicious)	R=0,465-0,597	Abbott (1994)
alma (Delicious)	R=0,481-0,498	Abbott és Liljedahl (1994)
alma (Elstar)	R <sup>2</sup> =0,92-0,93	De Belie et al. (2000)
alma (Golden Delicious)	R=0,848-0,867	Abbott és Liljedahl (1994)
alma (Golden Delicious)	R=0,86-0,88	Abbott et al. (1995)
alma (Golden Delicious)	R <sup>2</sup> =0,52	Shmulevich et al. (2003)
alma (Granny Smith)	R <sup>2</sup> =0,461	Shmulevich et al. (2003)
alma (Jonagold)	R <sup>2</sup> =0,93-0,98	De Belie et al. (2000)
alma (Malus domestica Borkh)	R <sup>2</sup> =0,4	Landahl és De Baerdemaeker (2001)
alma (Starkling Delicious)	R <sup>2</sup> =0,598	Shmulevich et al. (2003)
alma (Triple Red Delicious)	R=0,58-0,59	Abbott et al. (1995)
alma (York Imperial)	R=-0,018-0,176	Abbott és Liljedahl (1994)
körte (Conference)	R <sup>2</sup> =0,59	De Belie et al. (2000a)
körte (Doyenné)	R <sup>2</sup> =0,82	De Belie et al. (2000a)
körte (Pyrus ussuriensis)	R <sup>2</sup> =0,721-0,761	Gómez et al. (2005)
paradicsom	R=0,84	De Ketelaere et al. (2001)
sárgadinnye (Chiba F-11)	R <sup>2</sup> =0,873	Sugiyama et al. (1998)

Abbott és tsai (1992) megállapították, hogy a Magness-Taylor-féle keménység más mechanikai tulajdonságot mér, mint az akusztikus vizsgálat. Az a tulajdonság, amit az ember érzékel vágás,

ízlelés (harapás) során alapvetően közelebb áll a roncsolásos vizsgálathoz, mint a minimális deformációt okozó akusztikus vizsgálat.

Sugiyama és tsai (1998) szerint jobb összefüggést kapunk, ha az akusztikus módszerrel kapott eredményt a termés rugalmassági tényezőjével korreláltatjuk, mintha a Magness-Taylor-féle keménységgel. Erre a megállapításra jutott mérései alapján Abbott és Liljedahl (1994), Abbott és tsai (1995), Shmulevich és tsai (2002, 2003) is. Gómez és tsai (2005) megállapították, hogy a rugalmassági tényező és az akusztikus keménységtényező sokkal érzékenyebb a post-harvest változások kimutatásában, mint a Magness-Taylor-féle keménységmérés. Valószínű ez a Magness-Taylor-féle mérés azon tulajdonságából is adódik, hogy csak lokális információt ad a keménységről. A zöldség, gyümölcs heterogén szerkezete miatt, a Magness-Taylor-féle keménységmérés erősen függ a pozíciótól, míg az akusztikus technika roncsolásmentesen, egy globális mechanikai tulajdonságot vizsgál.

H. Chen és De Baerdemaeker (1992), H. Chen és tsai (1996) szerint a dinamikus keménységmérés során kapott érték alma esetében 3,7-szer, míg sárgadinnye esetén körülbelül hatszor nagyobb a statikus módszerrel mért keménységi értéknél.

Szerintem egy fontos publikáció az akusztikus módszer tulajdonságainak megismerése érdekében Felföldi és Fekete (2003, 2003a) cikke. A kutatók olyan módszert kerestek, amely alkalmas lehet az egészen kis változások (1-2 %) követésére. A kutatók szerint az akusztikus módszer -a roncsolásmentessége és a jó reprodukálhatósága miatt- megfelelő eszköznek bizonyulhat erre a célra.

Egy nagy pontossággal ismételhető, a kertészeti termények széles körén alkalmazható, automata gerjesztőrendszerrel felszerelt akusztikus mérőműszert fejlesztettek. Különböző esetekben bekövetkező mikro-változások detektálásával vizsgálták a rendszer pontosságát és alkalmazhatóságát. Mérték több kertészeti terménynél is a rövid idejű tárolás hatására bekövetkező víz- és turgorvesztést, az ismételt mechanikai impulzus hatását, az ejtés hatását a szövetekre, és in-vivo mérések keretében a fiziológiai folyamatok gyümölcsre kifejtett hatását. Alkalmasnak találták a fejlesztett rendszert számos gyümölcs és zöldség rezonancia frekvenciaváltozásának vizsgálatára. Megállapították, hogy a 0,1 %-os változás is észlelhető ezzel a rendszerrel. Az összeállítás alkalmas egy minta folyamatos mérésére órákon illetve napokon keresztül. Ezzel lehetőségünk nyílik olyan folyamatok jellemzésére is, amely során csak kis változás történik. Szoros korrelációt ( $R^2=0,98$ ) találtak a frekvenciaváltozás és a tömeg- (víz-)vesztés között. A több száz megütésből fakadó változást (roncsolódást) elhanyagolhatónak találták, mivel az kevesebb, mint 1 % volt a legtöbb termés esetében. Az ejtés hatására bekövetkező még nem látható változás is kimutatható volt a rendszerrel.

A hagyományos keménységmérő módszerek nem alkalmasak ilyen kis változások kimutatására szórásuk miatt. Ezért számos lehetőséget rejt magában a rendszer, az eddig a szórás miatt ki nem mutatható kismértékű változások feltárásában is.

### 2.3.1 Az akusztikus módszer elrendezéseinek típusai

Többfajta elrendezési mód létezik a gyümölcsök, zöldségek keménységének vizsgálatára. Az elrendezéseket a gerjesztés módja és a hangválasz érzékelésének módja szerint csoportosítanám.

#### Gerjesztés módja szerint lehet:

- *Adott vagy egy bizonyos frekvencia tartományban változó frekvenciájú rezgéssel (hanggal) történő gerjesztés*

Ezt a gerjesztési típust használta kutatásaiban pl.: Abbott et al. (1968, 1992, 1994, 1995), Finney (1970), Yong és Bilanski (1979), Kimmel (1992), Peleg (1993), Liljedahl és Abbott (1994), Muramatsu et al. (1997)

- *Kis impulzusú megütéssel (mechanikai gerjesztéssel) történő gerjesztés*

Ilyen gerjesztési módszerrel mértek vizsgálataik során pl.: H. Chen és De Baerdemaeker (1992, 1993, 1993a, 1995, 1995a), P. Chen et al. (1992), Vandewalle et al. (1994), Gatchalian és De Leon (1994), Sugiyama et al. (1994, 1998), Shmulevich et al. (1995, 2002, 2003, 2003a), Felföldi (1996, 1996a), Langenakens et al. (1997), Schotte et al. (1999), Felföldi és Fekete (2003, 2003a), Polderdijk et al. (1999), De Belie et al. (2000, 2000a), Jancsók et al. (2001, 2001a), De Ketelaere et al. (2001, 2001a), Gómez et al. (2005)

A rezonancia frekvencia méréséhez a minta megbízható gerjesztése szükséges, ami garantálja, hogy a minta az ő rezonancia frekvenciáján rezeg anélkül, hogy a gerjesztéstől kárt szenvedne.

Az akusztikus módszer kutatásának kezdetén a mintákat az első rezgéstípussal gerjesztették, azonban az elmúlt években a kis impulzusú megütéssel történő gerjesztés egyre „népszerűbb” lett. Ennek valószínűleg, az az oka, hogy az első gerjesztési technikával való mérés elég időigényes, mivel általában egy adott frekvencia tartományban periodikusan változó jelek sokasága szükséges a gerjesztéshez. Ez nem elég gyors és hatékony on-line mérések alkalmával sem. Ezért mostanában a kutatók már kis impulzusú megütéssel gerjesztik a mintákat. A minta válasza ekkor is hordozza a rezonancia frekvencia kinyeréséhez szükséges információt. A megütéssel való gerjesztés ideje minimálisra csökkenthető, így alkalmas lehet on-line rendszerek építéséhez is.

A kis impulzusú megütéssel történő gerjesztést vizsgálva számos kérdés vetődik fel. Mint például:

*Változik-e a kapott válaszjel, ha változtatjuk a megütés erősségét? Mekkora ütési sebességgel gerjesszük a mintát? Milyen tömegű és anyagú gerjesztő eszközt használjunk? stb.*

Gómez és tsai (2005) vizsgálták, hogyan változik a kapott jel, ha különböző sebességű „kalapáccsal” gerjesztik a mintát. Azt tapasztalták, hogy a 0,3-1,5 m/s-os tartományban -amiben a méréseket végezték- a sebesség csak a jel nagyságára volt hatással, míg a rezonancia frekvencia értéke változatlan maradt.

H. Chen és De Baerdemaeker (1995) méréseik alapján a 10-18 g tömegű gerjesztő eszközt ajánlják a méréshez. Megállapították, hogy az ettől nehezebb eszköz, már roncsolhatja a mintát.

A kutatók azt ajánlják, hogy egy 10 g-os eszköz kezdeti sebessége kb. 1,4 m/s legyen, míg Gómez és tsai (2005) a 9,5 g-os eszközzel és 0,84 m/s-os sebességgel végezték a méréseket.

H. Chen és tsa megállapították, hogy bármilyen rugalmassági modulusú anyagot használhatunk gerjesztő eszközként, viszont a 40 MPa-nál puhább anyag esetében nagyobb ütközési sebességű gerjesztés szükséges.

Tehát a fent említett publikációkból kiderül, hogy a megütés erőssége nem befolyásolja a kapott rezonancia frekvenciát, mert az a minta paramétereitől (keménység, nagyság) függ. Ügyelni kell azonban arra, hogy a gerjesztés során a minta ne szenvedjen sérülést, ezért ezt szem előtt tartva kell kiválasztani a gerjesztő eszköz tömegét, illetve a megütési sebességét.

#### **A rezgés (hangválasz) érzékelésének módja lehet:**

- *Érintkező*, ezen belül használhatnak az érzékelésre
  - *gyorsulásérzékelőt*, (Liljedahl és Abbott (1994), Abbott et al. (1968, 1992, 1994, 1995), Finney (1970), Yong és Bilanski (1979), De Ketelaere et al. (2001, 2001a), Jancsó et al. (2001, 2001a), Peleg (1993)
  - *rugalmas piezoelektromos érzékelő filmet* (Gómez et al. (2005), Shmulevich (1995, 2002, 2003, 2003a), Polderdijk et al. (1999),
- *Érintkezésmentes*, ez az érzékelés történhet:
  - *mikrofonnal* (P. Chen et al. (1992), H. Chen és De Baerdemaeker (1993, 1995, 1995a), Gatchalian és De Leon (1994), Vandewalle et al. (1994), Sugiyama et al. (1994, 1998), Felföldi (1996), Langenakens et al. (1997), Muramatsu et al. (1997), Schotte et al. (1999), De Belie et al. (2000), Felföldi és Fekete (2003, 2003a),
  - *Doppler elven működő lézeres rezgésszámláló (laser Doppler vibrometer) segítségével* (Terasaki et al. (2001), Terasaki et al. (2005))

Az érintkező érzékelővel történő mérésnél előfordulhat, hogy az érzékelő gátolja a termény felületén kialakuló rezgéseket, ezért a szövetek tényleges rezgései nem mérhetők pontosan (Terasaki et al. (2001)). Az érintkezésmentes érzékelő további előnye az érintkezővel szemben az, hogy könnyebb kialakítani a mérést az ilyen típusú keménységmérő elrendezést, mert az érzékelőnek nem kell közvetlenül a minta felületéhez érnie. Problémát okozhat, azonban például a mikrofon - mint érintkezésmentes érzékelő- használata zajosabb helyeken (pl. üzemben). Ekkor a megfelelően tiszta jel érzékelése végett gondoskodnunk kell a környező hangok (zajok) kizárásáról. Ez a probléma nem merül fel az érintkezéssel és a Doppler elven működő lézeres technikánál.

### **2.3.2 In-vivo mérések**

Az akusztikus technika előnyei közé tartozik, hogy lehetőségünk nyílik a minták roncsolásmentes mérésére. Ezt a tulajdonságot kihasználva módunkban áll egy adott egyed többszöri vizsgálata is, így egészen szabatos képet kaphatunk a minta állományváltozásáról tárolás és érés során. Ezen kívül kiküszöbölhetjük a különböző egyedek szórásából keletkező hibát.

A technika másik előnye, hogy maga a mérési összeállítás elég kicsi ahhoz, hogy hordozható legyen, így nemcsak a laborban végezhetünk vizsgálatokat, hanem akár a szabadföldeken is. Ezt a két tulajdonságot kihasználva kutatások kezdődtek kertészeti termények in-vivo (élő szervezetekben végbemenő folyamatok) mérésére.

Vandewalle és tsai (1994) almát és paradicsomot vizsgáltak érés és fejlődés során. A mérés mindkét esetben úgy történt, hogy a mintát egy kis impulzusú megütéssel gerjesztették. Az ellentétes oldalon a minta felületétől néhány milliméterre lévő mikrofon rögzítette a termény hangválasztát. Az akusztikus keménységtényező számításához a paradicsom esetében a tömeget a minta méreteiből becsülték. Ezt a módszert azonban nem találták megfelelőnek alma esetében, így ott a szüretelési tömeggel számoltak. A két kísérletnél a fán és a laborban mért keménységek jól korreláltak egymással ( $R^2=0,986$ ). Az alma mérés csak 4 napig tartott, mialatt azt figyelték van-e szignifikáns különbség a délelőtti és délutáni almakeményiségek között. Nem találtak különbséget a más-más időpontban végzett mérések között. Az akusztikus keménység egy adott érték körül ingadozott.

A paradicsom bogyók mérése során, azt vizsgálták, hogyan reagál a termés a szárazság okozta stresszre. Azt az eredményt kapták, hogy a bogyók nagy része kicsit keményebb lett a stressz hatására. Ez a kutatók véleménye szerint azonban csak elővizsgálat, több mérési eredmény szükséges ahhoz, hogy ebből bármiféle következtetés levonható legyen.

De Belie és tsai (2000a) két körtefajta keménységét vizsgálták a fán érés közben. Céljuk a körténél oly fontos optimális szüret időpontjának meghatározása volt. A vizsgálat során a gyümölcsöt a szár felőli részén gyengén megütötték és egy gyorsulásérzékelővel mérték a kapott jelet a körte alján. Ha

fújt a szél akkor több mérést is végeztek egy mintán, hogy kiküszöböljék a szél zavaró hatását. A minta tömegek becslésének érdekében minden héten leszedtek néhány gyümölcsöt és meghatározták a méretek és a tömeg közötti összefüggést. Ezek tudatában a körte maximális átmérője és magassága alapján -a számítások szerint- a tömegbecslés hibája 2-5 % volt. A méréseket, két egymást követő évben több hétig végezték a szüretelési érettség elérése előtt és után. A leszedett gyümölcsöket szobahőmérsékleten tovább tárolták. Megállapították, hogy érés során a körték keménysége csökken, mind roncsolásmentesen, mind roncsolásos módszerrel mérve (Magness-Taylor-féle keménységmérés). A két módszer közötti korreláció a Doyenné körtefajtánál elég magas ( $R^2=0,82$ ) volt. Megfigyelték, hogy a minták keménysége rohamosan csökkent a szüret előtti 1-3 hétben. Nem találtak szignifikáns különbséget az optimális szüret előtt és az optimális szüret időpontjában szedett körték akusztikus keménységtényező változásában tárolás során. Viszont a túlérett gyümölcsök puhulása nagymértékű volt tárolás során. A kísérlet végén megállapították, hogy ezen eredmények alapján az optimális szüret időpontjának pontos meghatározása még nem lehetséges, ennek elérése további kísérleteket igényel.

Landahl és De Baerdemaeker (2001) almákat vizsgáltak érés során. Céljuk az volt, hogy megbizonyosodjanak arról, hogy az alma keménységváltozása követhető érés során in-vivo mérésekkel. Ezért 6 fán több mint 200 gyümölcsöt vizsgáltak 10 hétig, beleértve a kereskedelmi szüret előtti és utáni időszakot is. Hetente leszedtek néhány almát a laborban végzett referencia vizsgálatokhoz (akusztikus keménység, Magness-Taylor-féle keménység, színmérés, víztartalom, vízpotenciál). Az alma egyedek rezonancia frekvenciája monoton csökkent a vizsgálati időszak alatt. Az eltérés a különböző almák sajátfrekvenciája között nagyobb volt, mint az egyedi almákon tapasztalt frekvenciaváltozás. A fán és leszedés után a laborban mért almák rezonancia frekvenciái jól korreláltak egymással ( $R^2=0,99$ ). A kettő közötti kis eltérés az alátámasztásból/felfüggesztésből adódhat. A Magness-Taylor-féle keménység és az akusztikus keménységtényező közötti összefüggés gyenge volt ( $R^2=0,4$ ).

Felföldi és Fekete (2003, 2003a) in-vivo előkísérletet folytattak, miután meggyőződtek arról, hogy az akusztikus módszer lehetőséget biztosít a kis (0,1 %-os) változások kimutatására is. Két héten keresztül, kétnaponta végeztek méréseket a nap ugyanazon szakában. Két almafa gyümölcseinek a frekvenciaváltozását figyelték. Minden minta nagyon hasonlóan viselkedett a vizsgálat során. A gyümölcsök rezonancia frekvenciái szinkronban változtak; nyilván a fa élettani folyamatainak köszönhetően. Ez a folyamat megszakadt mielőtt a minta magától leesett.

Fent említett publikációk tanulmányozása után felmerül a kérdés, hogy *alkalmas lehet-e az akusztikus módszer hosszabb élettani folyamatok leírására, jellemzésére, illetve vizsgálható-e ezzel a módszerrel a fejlődési és érési folyamatok keménységre gyakorolt hatása?*

Az előzőekben ismertetett publikációkból kiderül, hogy néhány kutató csoport végzett már in-vivo méréseket, azonban szinte mindegyik csak előkísérletnek fogható fel. Még számos lehetőséget rejt magában az akusztikus módszer ilyen irányú alkalmazása.

Az is kiderült a publikációkból, hogy bizonyos nehézségek merülnek fel az in-vivo mérés alkalmával. Egyik nehézség a minta tömegének meghatározása. Ez általában a minta méretei alapján kerül becslésre. Figyelemmel kell azonban arra is lenni, hogy a termény sűrűsége is változhat a növekedés/érés során.

A másik, ami problémát okozhat a szabadtéri vizsgálatok alkalmával a szél. Mind a mikrofonnak, mind a gyorsulásérzékelővel való jelrögzítésnél hibás, illetve zajos jelet eredményezhet az, ha fúj a szél.

Az akusztikus vizsgálat -köszönhetően a jó reprodukálhatóságának és roncsolásmentességének- olyan lehetőséget biztosít, ami eddig nem volt elérhető. Így számos olyan tevékenység vizsgálata is megvalósulhat, ami nagymértékben elősegítheti bizonyos élettani folyamatok leírását, illetve megértését. Ezért tudományos szempontból is egy nagyon fontos illetve hasznos módszer az akusztikus módszer.

### **2.3.3 Végeselem módszerrel végzett vizsgálatok**

A technika rohamos fejlődése új lehetőségeket nyitott meg e tudományterületen is. A számítógépek elterjedése és az új adatrögzítési berendezések lehetővé tették a rezonanciás technikák javítását, finomítását és a különböző paraméterek hatásának kutatását. A számítógépes szimuláció segítségével információt kaphatunk a terményben kialakult rezgésekről, a minta rezgés közbeni deformációjáról (az ún. módalokról), ami útmutatást adhat a kísérletek hatékony tervezésében és a kísérleti eredmények értelmezésében. Tetszőlegesen változtathatjuk a modell tulajdonságait, illetve a zavaró hatásokat (pl. a nem tökéletes gömb alak, betegség megléte) is kiküszöbölhetjük, így a rezgéseket pontosan elemezhetjük, vizsgálhatjuk.

A kutatások során kétfajta rezgési módalakat azonosítottak, a torziós („torsional” vagy „flexural”) és a gömb („sphere”, „longitudinal”, „compression” vagy „oblate-prolate”) alakokat. Mindegyik rezgési típusnál a legalacsonyabb frekvenciájú módot tartják a legfontosabbnak. A torziós módoknál a rezgés mindig tangenciális irányban történik a mintán, míg a gömb módok rezgése sugárirányú. A rezgés során a gömb módalakat egy sugár irányú kiterjedés jellemzi egy irányban, ezzel egyidejűleg a rá merőleges irányban, pedig egy rövidülés figyelhető meg. Ennek köszönhetően a különböző vibrációs módok mérése különböző szenzorhelyzetekben lehetséges. Kezdetben (Abbott (1968)) a legalacsonyabb torziós módot használták a keménység meghatározásához, mert ez a rezonancia frekvencia kevésbé függ a megütés és a jel érzékelésének



helyétől. A mikrofonnal illetve az egy-tengelyirányban mérni képes gyorsulásérzékelővel a torziós nem, csak a gömb módok észlelhetők (Cherng és Ouyang (2003)), ezért ezen technikák elterjedésével a gömb módalak használata egyre kedveltebb lett, annak ellenére, hogy a rezonancia frekvencia érzékenyebb a gerjesztés helyére és az érzékelési pozícióra.

Rosenfeld és tsai (1992) egy válogató rendszerhez végeztek előtanulmányokat végelemek módszer segítségével. Megállapították, hogy a rezonancia frekvencia növekszik a Young modulus növekedésével, és csökken a méret- (tömeg-) növelésekor. A sűrűség (a 800-880 kg/m<sup>3</sup> közötti tartományban) csak kis változást okozott a rezonancia frekvenciában, viszont a tömeg és a keménységváltozás nagymértékben hatással volt a minta rezonancia frekvenciájára. Ezek a megállapítások megerősítik azt a tényt, hogy lehetséges megfelelő keménység szerinti osztályozás rezonancia frekvencia alapján. Meg kell jegyezni, hogy a mérés pontosságát befolyásolhatja a sűrűségben és az alakban rejlő variabilitás és a mérőrendszer pontossága.

H. Chen és De Baerdemaker (1992, 1993, 1993a, 1996) megállapították, hogy a különböző összeállítások létrehozhatnak és eltüntethetnek rezgési módalakokat, ezért fontos megvizsgálni mely megütési illetve érzékelési pozíció a legmegfelelőbb a módalakok érzékelésére. A kutatók a megütésre adott hangválaszt mikrofon segítségével észlelték. Azt a helyet keresték, ahol a gömb módalak legjobban és legtisztábban érzékelhető. A szerzők a gömb módalakokkal történő keménységbecsléshez a gyümölcsöt az egyenlítője mentén tanácsolják megütni és a jel érzékelésére is az egyenlítőt ajánlják. Ennek oka, hogy ebben a régióban kevesebb módalak mérhető és ezek a módalakok rezonancia frekvenciái egymáshoz közel esnek.

Jancsók és tsai (2001) azt vizsgálták, hogy lehetséges-e akusztikus módszerrel előre jelezni a körtében kialakult üregesedést. Számítógépes tomográfiával megfigyelték a mintában lévő üreg helyét és nagyságát, majd elkészítették a körte modelljét. A pontos alak meghatározásához videokamerát használtak. A mintát egy forgatható asztalra tették és több képet készítettek körténként. Ennek alapján alkották meg a 3D-s modelleket. A modellek rezonancia frekvenciáit üreggel és a nélkül is vizsgálták. Az üreggel, illetve az üreg nélkül mért rezonancia frekvenciák közötti különbség kicsi volt. Ez azt jelenti, hogy szinte lehetetlen különbséget tenni az üreges és nem üreges körte között rezonancia frekvencia alapján. Noha a különbség az üreges és nem üreges körte között különböző volt más-más rezgési módoknál. A magasabb rendű komplex módok nagyobb különbséget mutattak, azonban ezek a módok nem mérhetőek pontosan, de biztosan felelősek a vibrációs spektrum alakjáért.

### 2.3.4 Hogyan befolyásolja az alak az akusztikus jellemzőket?

Több kutató (pl. Abbott és tsai (1992), Abbott és Liljedahl (1994)) is megfigyelte, hogy az akusztikus gerjesztés során kapott spektrum torzulását okozhatja az aszimmetrikus alak, így a rezonancia frekvencia is módosulhat.

H. Chen és De Baerdemaker (1992, 1993, 1993a, 1996) végelelem szimulációval vizsgálták mennyire érzékeny a keménységmérés a különböző gyümölcshalakokra. Megfigyelték, hogy az irreguláris alakú almánál több gömb módalak is előfordul. Létrehoztak azonos anyagi tulajdonságú (Young modulusú, sűrűségű, poisson arányú), de más-más alakú testeket és vizsgálták, hogyan hat az alak megváltozása a rezonancia frekvenciára. Megállapították, hogy a rezonancia frekvencia a minta felületének különböző pontjain mérve, néha jelentősen különbözik; ez a különbség annál nagyobb, minél inkább eltér a minta alakja a gömbtől. Megállapították, hogy ha a test tengelyszimmetrikus és a vállmagasság(H)/átmérő(D) arányt változtatják, akkor főleg az egyes módok rezonancia frekvenciái változnak. Ha azonban aszimmetrikus alakot hoztak létre (jellemmezhető a  $H_{\min}/H_{\max}$  illetve  $D_{\min}/D_{\max}$  arányokkal) akkor a rezonancia frekvencia alig változott, de a test vibrációs jellemzői (pl. a módalakok egymás utáni sorrendje) módosultak.

A cikkben tanácsot adnak a hiba csökkentésére. A pontos becslés frekvencia alapján akkor lehetséges, ha ismerjük a „ka” dimenziómentes frekvencia koefficiens, aminek a meghatározásához egyebek közt szükségünk van a gerjesztett módalakra, ami érzékeny az alma alakjára. Ennek meghatározása azonban bonyolult és időigényes mérési folyamatot igényel, így gyakorlati alkalmazása nem képzelhető el. Ezért a nem gömbalakból adódó néhány Hz-es eltérés csökkentése érdekében 3 mérési pontot ajánlanak az egyenlítőn, hogy ezek átlagával csökkenthető legyen a jelenlévő más módalakok hatása. Másik időtakarékos megoldás az, ha egyidejűleg három érzékelővel érzékeljük a kapott jelet.

Az akusztikus módszert nem teljesen gömb alakú termények (pl. körte) esetében is használják. Dewulf és tsai (1999) és Jancsó és társai (2001a) kutatást végeztek azért, hogy ezek az eredmények korrekten értelmezhetők legyenek és a mérés a leghatékonyabban történjen. A különböző alakú minták mechanikai vibrációjának elemzéséhez végelelem módszert használtak. Először az egyes körték rezgéseit kísérleti úton vizsgálták, majd a kapott eredményeket összehasonlították az azonos geometrián végzett szimuláció eredményeivel. A pontos alak meghatározásához látórendszert használtak. Ennek segítségével alkották meg az 50 darab 3D-s modellt, és az alaki jellemzőket (hossz/maximális átmérő, Fourier jellemzők) is ezek alapján számították ki. A kísérleti úton és a végelelem módszerrel számított eredmények jól korreláltak egymással. Az első 20 rezgési módalakot azonosították és kiszámították az ezekhez tartozó rezonancia frekvenciákat. A különböző alak, különböző térfogatot eredményezett és állandó sűrűség

mellett, más-más tömeget. Mivel a tömeg, hatással van a rezonancia frekvenciára, ezért normalizálták a mintákat egy adott tömegre (ez egy grafikus nyújtásnak felel meg). A végeelem módszer elemzés során megfigyelték, hogy az első 6 mód 0 Hz körüli. A vizsgálat során 4 különböző módalakat figyeltek meg: hajlongó, torziós, kompressziós vagy gömb (az egész minta deformálódik hosszanti irányban, összenyomódik, és ezzel egyidejűleg kinyúlik a másik irányba) és lélegző (a körtealakok alsó része deformálódik, laposabbá válik egy irányban és szélesebbé a rá merőleges irányba). Megfigyelték, hogy a magasabb módalakat egyre bonyolultabb rezgés jellemzi. A végeelem módszerrel több módalakat találtak, mint kísérleti úton. Lineáris összefüggést állapítottak meg a hossz/átmérő arány és a normalizált frekvenciaértékek között. Következőekben megállapították, hogy a gömbölyű rész minőségéről a lélegző mód ad információt, míg a szár felőli kúpos részről a hajlongó mód. További kísérletekben a körte lélegző módjának frekvenciáját összehasonlították azonos anyagi tulajdonságú és méretű gömb rezgéseivel. Különbséget alig találtak a két frekvencia között. Megállapították, hogy a lélegző mód gyakorlatilag érzéketlen a kúp alakú rész keménységváltozására, ezért ugyanaz az összefüggés használható a körtére, mint a gömb alakú terményekre.

A szimuláció szintén rávilágított arra, hogy a nem teljesen gömb alakú termények keménységbecslése is lehetséges a rezonancia frekvencia alapján, bár nagy gondot kell fordítani a módalok azonosítására, amikor megállapítjuk a rezonancia frekvenciát.

A végeelem módszer segítségével Cherng és tsai (2003, 2005) egy új keménységtényezőt ( $c_3$ ) vezettek be ellipszoid alakú testekre. A kutatásuk célja egy egyszerű és hatékony képlet kidolgozása volt ellipszoid alakú testek rugalmasságának becslésére, amely általánosítható gömbre is. Két gömb módalakat választottak ki az ellipszoid keménységtényezőjének meghatározásához ( $M_{20}$ ,  $M_{12}$  (a jelöléseket a publikációból vettem át)). Az  $M_{20}$  az első gömb módalak az ellipszoid hosszabbik tengelye mentén, míg az  $M_{12}$  az első gömb módalak a rövidebbik tengely mentén. Az  $M_{20}$ -as és  $M_{12}$ -es módalakok közelítőleg lefedik a sugár irányú mozgást, ezért használatuk ésszerű az ellipszoid rezgésének jellemzésében. Az általuk kifejlesztett új keménységtényező ( $c_3$ ) arányos a rugalmassági modulussal és a következő módon számítható:  $c_3 = (f_1^2 * f_2^2)^{2/3} * m^{2/3} * \rho^{1/3}$ , ahol az  $f_1$  a  $M_{20}$ , míg az  $f_2$  az  $M_{12}$  módalak rezonancia frekvenciája, az  $m$  a minta tömege és a  $\rho$  a sűrűsége. Ez az alak nagyon hasonlít a hagyományos keménységtényező alakjára. Ha az ellipszoid gömb alakú, akkor  $f_1 = f_2 = f$ , tehát megkaphatjuk az általános használt keménységtényezőt:  $f^2 * m^{2/3} * \rho^{1/3}$ . Ebből következik, hogy gömb alakú terményekre is használható az összefüggés. Az elméleti elgondolást végeelem módszer segítségével ellenőrizték. Az elméleti és a kísérleti frekvenciaértékek között alig volt különbség. A geometriai paraméterek módosításával megbizonyosodtak arról, hogy az ellipszoid alakú termény keménységének becslése pontosabb a  $c_3$ -mal, mint a hagyományos keménységtényezővel. A

kísérlet végén megállapították, hogy az új keménységtényező akkor használható, ha a tengelyek aránya 1 és 2 közé esik. Bár az új keménységtényező ígéretes a termények keménységének előrejelzésében, azonban ez az összefüggés csak a nyújtott („prolate”) ellipszoidra alkalmazható. A lapított ellipszoidnál („oblate”) más összefüggés használata szükséges. Ezzel kapcsolatosan további kísérleteket végeztek, melyek 2005-ben kerültek publikálásra. Az előbbi elgondolások alapján bevezették az újabb keménységtényezőt ( $c_4$ ), amely a következő képen számítható ki:  $c_4 = (f_2 * f_1^2)^{2/3} * m^{2/3} * \rho^{1/3}$ . Megállapították, hogy a  $c_3$  alkalmazása akkor ajánlott, ha a tengelyarány nagyobb, mint 1 (nyújtott ellipszoid); ha a tengelyarány kisebb, mint 1 (lapított ellipszoid) akkor a  $c_4$  használata javasolt. Megfigyelték, hogy a nyújtott ellipszoidnál az  $f_1$  az alacsonyabb frekvencia, míg az a lapítottnál az  $f_2$ . Tehát az előző képlet általánosan úgy írható fel, hogy  $c = m^{2/3} * \rho^{1/3} * (\min(f_1, f_2) * \max(f_1, f_2)^2)^{2/3}$ . Ez az egyenlet, mind a nyújtott, mind a lapított ellipszoidra használható, és praktikus azért, mert nem szükséges meghatározni, hogy a termény nyújtott vagy lapított. Nem szükséges elkülöníteni a két rezgési módot (M20, M12) sem egymástól, egyedül csak a módalakok frekvenciáit kell meghatározni.

A végeelem módszer előnye, hogy különböző anyagú, méretű, alakú modelleket lehet létrehozni és különféle határfeltételek megadása után a minta rezgéseit szimulálni lehet. A szimuláció a rezgés során keletkező deformációt a vizualizálás kedvéért megnöveli, illetve lelassítja. A végeelem módszer útmutatást adhat a kísérlettervezésben, pl. vizsgálni lehet vele, a megfelelő rezgési mód észleléséhez hol helyezzük el az érzékelőt. A szimulációt használhatjuk különböző kísérletek elvégzésére, ehhez a legtöbb esetben valódi minta nem szükséges.

E technika korláta, hogy a szimuláció és a kapott összefüggések a minta különböző részeinek (mag, hús, héj) anyagi tulajdonságain alapul. Az ilyen típusú információ nagyon gyakran hiányos, ezért a modell tulajdonságait vagy becsléssel, vagy kísérleti úton határozzuk meg. Így a szimuláció pontossága nagymértékben függ a becslés, illetve a mérés helyességétől. A végeelem módszer erősödésével érdemes több energiát és időt fektetni abba, hogy a kertészeti termények különböző szerkezeti részeinek mechanikai tulajdonságait megállapítsák.

### 2.3.5 Az akusztikus módszerrel kapcsolatos publikációk összefoglalása

Összefoglalva elmondható, hogy az akusztikus módszer egy nagyon ígéretes módszer, melynek a szabatos alkalmazásához, illetve szabványosításához ma is számos nemzetközi kutatócsoport végez vizsgálatokat.

A kutatók megegyeztek abban, hogy a minta rezonancia frekvenciája és a termény keménysége összefügg egymással. Megegyezik a véleményük abban is, hogy az akusztikus keménységtényező kiszámításához a frekvencián túl a termény egyéb geometriai jellemzőjére, pl. a tömegre is

szükségünk van. Megfigyelték azt a tényt is, hogy a nagyobb méretű és puha termények alacsonyabb rezonancia csúcsot produkálnak, mint a kisebb és keményebb minták.

Az akusztikus módszer előnye közé sorolható fel, hogy az egész termény keménységét jellemzi, ellentétben a penetrometriás mérésekkel. A vizsgálat gyorsan és roncsolásmentesen elvégezhető. Ezekből a tulajdonságokból fakadóan alkalmas a módszer arra, hogy -akár on-line válogatósor segítségével- minden egyes egyedet megvizsgáljunk és a nem megfelelő minőségűt kiválasszuk, illetve egy adott tétel keménységét becsüljük. Az akusztikus módszerrel alkalmunk van az egyes egyedek állományváltozásának követésére is, tárolás, illetve érés során. Mivel a módszer alkalmas a nagyon kis változások kimutatására, ezért az eddig, a mérési módszer szórásából adódóan nem megfigyelhető kis változások is tanulmányozhatók, tehát a kutatásban is egy nagyon hasznos módszerről van szó.

További előny, hogy az egyszerű összeállításnak és a kis méretnek köszönhetően, in-vivo mérések is végezhetők ezzel a módszerrel. Így a fejlődés során bekövetkező változásokat is figyelemmel követhetjük, ezért különböző élettani folyamatok megértésében is segítségünkre lehet az akusztikus módszer.

A technika hátránya, hogy a kapott akusztikus keménységtényező nem mindig bizonyult alkalmasnak a Magness-Taylor-féle keménység előrejelzésére, ami valószínű a mérések közötti alapvető különbségekből adódik (statikus↔dinamikus, lokális↔globális).

A másik nagy hátránya, hogy a módszer, csak bizonyos geometriájú (közel gömb alakú) és nagyjából homogén termények esetében alkalmazható.

Az irodalmi összefoglalás alapján a következő kérdések merülnek fel:

- *Elképzelhető-e, hogy az akusztikus módszerrel a gömbtől lényegesen eltérő alakú kertészeti termények kerüljenek vizsgálatra? Ha igen, akkor milyen kísérleti elrendezésben és mennyire megbízható a kapott eredmény?*
- *Alkalmas lehet-e az akusztikus módszer hosszabb élettani folyamatok leírására, jellemzésére, illetve vizsgálható-e ezzel a módszerrel a fejlődési és érési folyamatok keménységre gyakorolt hatása?*

### 3 CÉLOK

Az irodalmi áttekintés alapján a következő célokat tűztem ki:

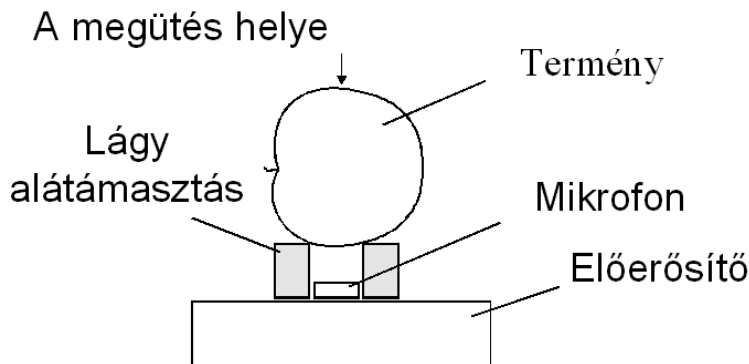
- Az akusztikus módszer használhatóságának megállapítása gömbtől eltérő alakú termények esetében. A megfelelő elrendezés kialakítása a jól detektálható hangválasz érdekében.
- Az ütésvizsgálati módszer esetében a mérési paraméterek (ütési sebesség, hőmérséklet, ütőfej alakja, ütőfej anyaga) hatásának vizsgálata a kapott ütésvizsgálati jelre és annak paramétereire.
- Sárgarépa hőkezelés hatására bekövetkező keménységváltozásának vizsgálata akusztikus és ütésvizsgálati módszerrel; a kapott eredmények összehasonlítása a referenciaként elfogadott, peneterometriás keménységméréssel.
- Az akusztikus módszer alkalmazhatóságának meghatározása paradicsom in-vivo keménységmérésére. Az akusztikus módszer alkalmazása a paradicsombogyó keménységcsökkenésének követésére a fejlődés ésérés során.

## 4 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Először ismertetem a mérésekhez használt két kulcsfontosságú, az akusztikus, illetve az ütésvizsgálati módszert. Az esetek nagy részében az itt bemutatott összeállítást használtam. A fejezet többi részében az eredmények fejezetben leírtak sorrendjében ismertetem a felhasznált anyagokat, illetve az általam használt egyéb mérési módszereket. Néhány kísérlet esetében a következőkben leírt akusztikus és ütésvizsgálati módszer egy része valamilyen változtatáson ment keresztül. Ezekről az eltérésekről is beszámolok az egyes fejezetekhez tartozó részeknél.

### 4.1 Akusztikus módszer

A zöldségek, gyümölcsök keménységének meghatározása egy erre a célra kialakított számítógépes mérőrendszerrel történt. A vizsgálat során a terményt a mikrofon fölé, egy habszivacsból készült lágy és egyben rugalmas alátámasztásra helyezzük. Vizsgálatok szerint az ilyen elrendezés lehetővé teszi a termény szabad rezgését és a szivacs által határolt térben megfelelő hangnyomás alakul ki a kellő érzékenység eléréséhez (Felföldi, (1996, 1996a)). Az alátámasztásra helyezett mintát egy pálcával gyengéden megütjük, rezgésbe hozzuk és a termény áttellenes oldalán az ütésre adott hangvázlatát egy mikrofonnal rögzítjük. A mérőrendszer felépítését a 4. ábra mutatja.



**4. ábra:** Az akusztikus módszer mérési elrendezése  
Forrás: Felföldi (1996a)

A kapott hangvázlatot a mikrofon és egy hangkártya segítségével a számítógépbe vezetjük. Az elemzés során a vizsgált minta keménységéről információt hordozó, a terményre jellemző frekvenciát (Felföldi, 1996a,b) egy speciális program határozza meg. Vizsgálatok során erre a Budapesti Corvinus Egyetem Élelmiszertudományi Karának Fizika-Automatika Tanszékén kifejlesztett „Stiffness” nevű programot használtuk. A program a rögzített hangvázlatból meghatározza és grafikusán meg is jeleníti az adatsor Fast Fourier Transzformáltját (5. ábra) és a kiválasztott frekvenciasávban automatikusan megkeresi a hangvázlat jellemző frekvenciáját.

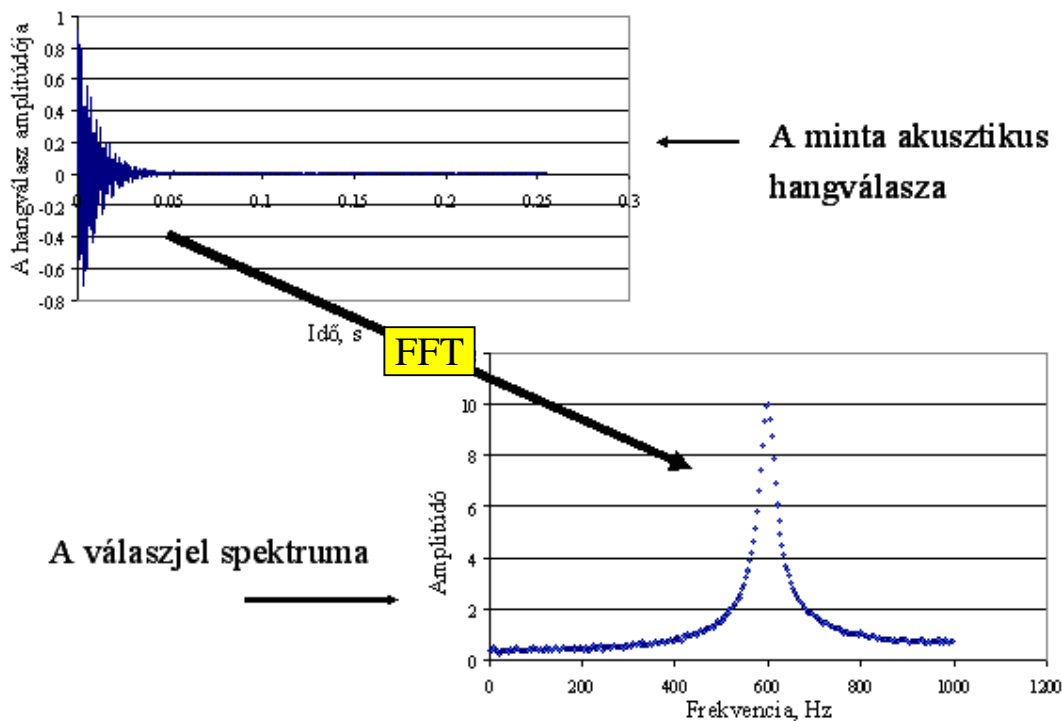
A jellemző frekvenciából és a tömegből a terményre jellemző akusztikus keménységet kapjuk, amit a következő módon számíthatunk ki (Felföldi és Ignát (1999), Róth és tsai (2004)):

$$S = f^2 \cdot m \cdot 10^{-6},$$

ahol  $S$  az akusztikus keménységtényező [N/mm],

$f$  a termény jellemző frekvenciája (Hz),

$m$  a termény tömege (g).



**5. ábra:** A rögzített hangválasz és annak Fast Fourier Transzformáltja  
 Forrás: Felföldi, Fekete (2003a)

## 4.2 Ütésvizsgálati módszer

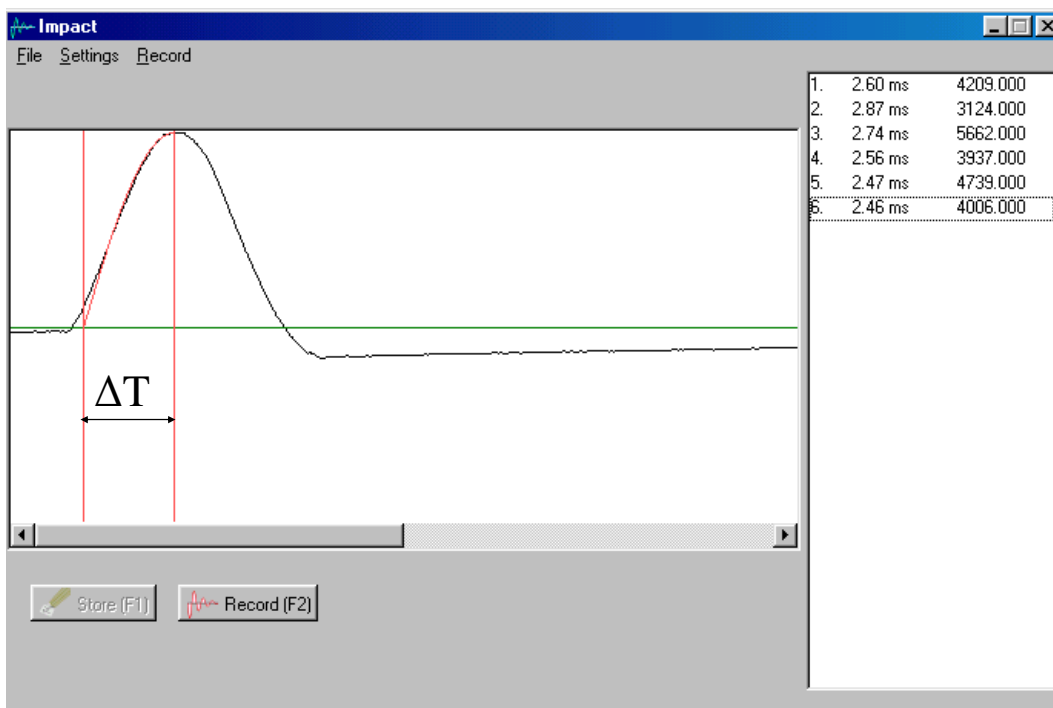
Ezzel a vizsgálattal felületi keménységet mérhetünk. A rendszer egy impactort, egy megfelelő jelátalakító elektronikus egységet és egy számítógépet tartalmaz (6. ábra) (Felföldi és Fekete (2000)). Ezt a kézi megütéses összeállítást használtam a termények tárolás alatt bekövetkezett változásainak vizsgálatára. A terményt mérés során a kb. 150 g tömegű, 22 cm hosszú PCB Piezotronics 086c03 típusú impactorral, -továbbiakban ütésvizsgálati kalapáccsal- ütjük meg,





**6. ábra:** Impact módszer mérési elrendezése

amiben egy piezo-elektromos elven működő erőérzékelő található. Az erőérzékelő feszültségjelét a jelátalakítón keresztül számítógépre visszük és ott egy speciális program segítségével elemeztük azt. A mérések során használt „Impact” nevű programot a Budapesti Corvinus Egyetem Élelmiszertudományi Karának Fizika-Automatika Tanszékén kifejlesztették ki. A program által megjelenített görbét a 7. ábra illusztrálja. A program elmenti a görbe kezdeti és maximum pontja közötti időtartam nagyságát és az erőérzékelő digitális jelét.



**7. ábra:** Az impact program által megjelenített görbe

Az ütésvizsgálati keménységtényező kiszámítása a következő elméleti elgondoláson alapul: a vizsgált termék rugalmas, így a mérés során úgy viselkedik, mint egy rugó. Feltételezzük, hogy megütés alatt a kalapács és termék együttesen harmonikus rezgőmozgást végez, így a kapott görbére szinuszos görbe illeszthető. Ekkor az  $m$  tömegű test rezgési ideje ( $T$ ) a következő:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}, \text{ ahol a } D \text{ a rugóra (a terményre) jellemző paraméter.}$$

Tehát a felületi keménység jellemzésére elméleti megfontolások és kísérleti eredmények alapján a szinuszos görbe első hullámának kezdő és maximum pontja közötti időkülönbséget használjuk fel:

$D = 1/\Delta T^2$ , ahol  $D$  – ütésvizsgálati keménységtényező,  $ms^{-2}$

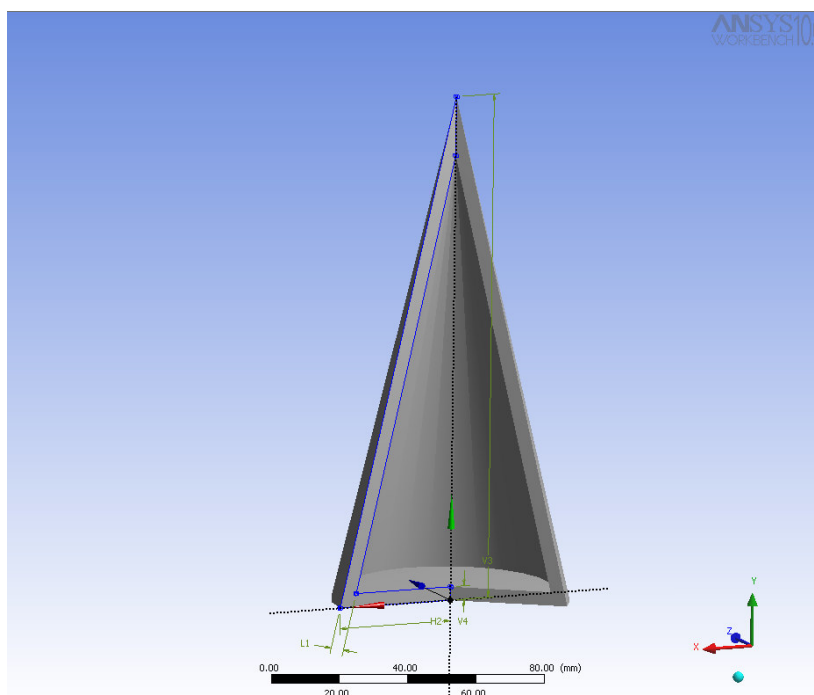
$\Delta T$  - szinusz görbe kezdő és maximum pontja közötti időkülönbség.

(Felföldi és Fekete (2000))

### 4.3 Akusztikus módszer alkalmazhatósági körének bővítése

#### 4.3.1 Végeselem modellezés (Ansys 10.0)

A modellezéshez Magyarországon kedvelt Hó fajta paprikát vettem alapul. A Seminis Hungária Vetőmag Kft. katalógusában (2005-2006) feltüntetett átlag méreteket (magasság: 13-15 cm, vállszélesség 6-8 cm, húsvastagság: 4-5 mm) használtam fel a végeselem modellezésnél az objektum létrehozásához. A modellezéshez használt objektumot és paramétereit a 8. ábra mutatja.



#### Mérete:

Teljes magasság: 140 mm

Külső sugár: 35 mm

Húsvastagság: 4 mm

#### Anyagi tulajdonságai:

Young modulus: 1-10 MPa

Poisson arány: 0,35

Sűrűség: 1000  $g/cm^3$

**8. ábra:** A leegyszerűsített paprika modell metszetben és a modell paramétereit

#### 4.3.2 Paprika tárolás alatti puhulása

A tárolási vizsgálatokhoz 5 fajta (Danubia, Hó, HRF, Kamléleon, Kárpia) paprikát használtam fel. A Budapesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Karának Kísérleti Üzemében termesztett

bogyókat (fajtánként kb. 15 db-ot) gazdasági érettségben szedték le. Az első kísérletben a mintákat a gyors változás érdekében csomagolás nélkül közel két hétig szobahőmérsékleten tároltam, míg a másik kísérletben a minták a polcontartás általános körülményeinek megfelelően, 18 °C-on, hűvös pincében két hétig kerültek tárolásra. A kísérlet alatt 2-3 naponta vizsgáltam a fajtákat, és mértem a keménységváltozást és a tömegcsökkenést. A tárolási kísérlet során a méréseket ugyanazon paprika egyedek, ugyanazon pontján végeztem el.

Az akusztikus módszerrel a paprika mintákat két különböző helyen, a csúcsi és a váll részen ütöttem meg, míg az impact ütésvizsgálati módszer mérése során a bogyók oldal, illetve váll részének keménységét vizsgáltam.

#### **4.4 Nyitott kérdések a dinamikus keménységmérésben - metodikai vizsgálat**

A mérésekhez a Budapesti Corvinus Egyetem Élelmiszertudományi Karának Fizika-Automatika Tanszékén fejlesztett, számítógéppel vezérelhető automatikus impact mérőrendszert használtam. Ez az ütésvizsgálati mérőrendszer a kézi megütéses elrendezéstől a következőkben különbözik:

- A megütéshez használt impactor jóval kisebb (kb.20 g) tömegű, mint a kézi megütés esetében, az impactorban a PCB Piezotronics 352B68 típusú gyorsulásérzékelő található.
- A kalapács ütési erejét egy rugó, illetve a későbbiekben egy elektromágnes szabályozta, ezzel lehetővé téve a közel azonos megütési sebességet.
- A rendszer egy léptetőmotoros mintatartót is tartalmazott, melynek forgatását a számítógép végezte. Ennek köszönhetően egy minta pontosan ugyanazon pontja kerülhet vizsgálatra. A mérések során a mintatartó 6 °-ot fordult el a megütés után, tehát egy mintán 60 pont keménysége került meghatározásra.
- A megütést, a jel érzékelését, a kalapács kezdő pozícióba állítását és a mintatartó forgatását is a számítógép automatikusan elvégezte.

Hasonlóan a kézi megütéshez a Budapesti Corvinus Egyetem Élelmiszertudományi Karának Fizika-Automatika Tanszékén fejlesztett „Impact” programot került használtuk a kapott jel értelmezésére és a jellemző információ kinyeréséhez. A szoftver ugyanolyan módon határozta meg a termés felületi keménységére jellemző paramétert, ahogyan az a fejezet elején ismertetésre került.

A metodikai vizsgálatokhoz különböző gyümölcsöket és zöldségeket használtam. Ezeket a termények kereskedelmi forgalomból kerültek beszerzésre. A biológiai anyagokon kívül a természetes variabilitás kiküszöbölése érdekében modell anyagokat is vizsgáltam.

Az 5.2.1 fejezetben bemutatott reprodukálhatósági vizsgálatot különböző modellanyagokon:

- pingpong labdán,
- tenisz labdán,
- gumi labdán,
- tömör szivacs labdán, illetve
- szilikon gumi tömbön végeztem el.

Az 5.2.2 fejezetben leírt reprodukálhatósági vizsgálatot, illetve a felületi keménységváltozást a termény egyenlítője mentén a következő biológiai anyagokon végeztem el:

- alma
- nektarin
- paprika
- paradicsom
- hagyma
- körte

A különböző kialakítású kalapácsfejek okozta szöveti változás meghatározásánál a tesztalanyok nektarinok és körték voltak.

Az 5.2.3 fejezetben bemutatott rugalmas impactor 8 mm átmérőjű gumiból készült gömbsüvegben végződő henger alakú mérőfej. A gumi karakterisztikáját –mérés során bekövetkező feltételezett deformáció alatt– a Melléklet 82. ábrája mutatja be. A továbbiakban ezt a rugalmas gumi fejet, mint puha fej azonosítom.

A puha anyagból készült mérőfejjel almát, paradicsomot és barackot mértem.

A hőmérséklet ütésvizsgálati keménységtényezőre gyakorolt hatását (5.2.4. fejezet) alma, paprika és hagyma egyedeken vizsgáltam.

Minden esetben gyümölcsönként, zöldségenként minimum 3 ismételést történt.

#### **4.5 Sárgarépa állományváltozásának vizsgálata akusztikus és ütésvizsgálati módszerrel**

A sárgarépaikat mikrohullámú hőkezelésnek tettem ki. A hőkezelés célja a gyors állományváltozás elérése volt, hiszen így néhány másodperces kezelésnek köszönhetően nagymértékű belső szerkezetváltozás érhető el. Tehát a mikrohullámú hőkezelést a puhulás folyamat gyors előidézése érdekében használtam.

#### 4.5.1 A sárgarépák mikrohullámú hőkezelése

A sárgaréпамinták a kereskedelemből kerültek beszerzésre.

Az egész sárgaréпамinta mikrohullámú hőkezelése két teljesítményen történt: 500W-on illetve 900W-on. A kezelési idők a következők voltak: 30s, 60s, 90s, 120s, 150s, 180s, 210s, 240s 500W esetében, és 30s, 60s, 90s, 120s, 150s 900W esetében. Minden kezelési csoport 3 darab répát tartalmazott.

Két roncsolásmentes módszerrel (akusztikus és ütésvizsgálati), egy kompressziós vizsgálattal illetve egy dielektromos módszerrel határoztam meg a minták mechanikai tulajdonságainak változását hőkezelés során. Referencia módszernek a hagyományos penetrométeres vizsgálatot (SMS (Stable Micro System) XT-2A Precision Penetrometer) használtam. A minták keménysége mellett, annak dielektromos jellemzőit is vizsgáltam, hiszen ennek segítségével információt kaphatok a sejtekben, illetve a sejtközi térben történő változásokról.

A hőkezeléseket az egész sárgaréपán végeztem el és ugyanazon minta állományváltozását mértem mind a négy módszerrel. A dielektromos mérések egy részéhez illetve a penetrométeres vizsgálathoz 1 cm vastag szeleteket vágtam a mintákból.

#### 4.5.2 Sárgarépa akusztikus vizsgálata

A sárgarépa akusztikus vizsgálatánál a termény tenyészcsúcsát egy fa pálcával megütjük, és az átellenes oldalon (a szár részen) elhelyezett mikrofonnal rögzítjük a kialakult rezgéseket. A mikrofon kimenete a számítógép hangkártyájához csatlakozik. A Budapesti Corvinus Egyetem Élelmiszertudományi Karának Fizika-Automatika Tanszékén fejlesztett „Stiffness” nevű program segítségével történt meg az adatok transzformálása illetve a terményre jellemző rezonancia frekvencia meghatározása. A mintákat a 4. ábrán bemutatott mérési elrendezés szerint mértem. A hosszúkás termények esetében az elméleti elgondolás és gyakorlati tapasztalat alapján az akusztikus keménységtényezőt a következő módon számíthatjuk ki:

$$S = f^2 \cdot l^2, \text{ ahol } S: \text{ az akusztikus keménységtényező, } \text{m}^2/\text{s}^2$$

f: a terményre jellemző rezonancia frekvencia, Hz

l: a termény hossza, m

Felföldi, Muha, Tóta (2004)

#### 4.5.3 Réпамinták ütésvizsgálati módszerrel történő mérése

A minták ütésvizsgálati keménységének méréséhez a fejezet elején ismertetett elrendezést használtam. (6.ábra)

A répák felületi keménységét az egész répákon mértem három különböző ponton (a minta két végén és a közepén). A három pont átlagával jellemeztem a répa felületi keménységét.

A minták egészben kerültek mérésre.

#### 4.5.4 Dielektromos mérések

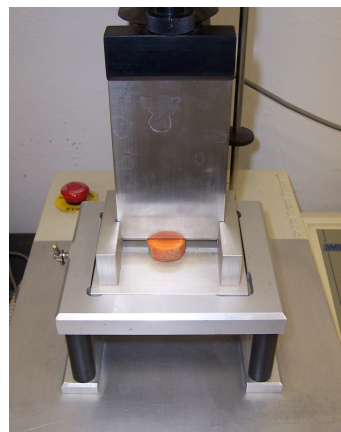
A répaminták impedanciáját és fázisszögét egy HP4284A típusú precíziós RLC mérővel határoztuk meg 30 Hz és 800 kHz frekvencia tartományban. A váltakozó áramú komplex impedancia az  $U=U_0 \cdot \cos \omega t + i \cdot U_0 \cdot \sin \omega t$  komplex feszültség és az  $I=I_0 \cdot \cos \omega t + i \cdot \sin \omega t$  komplex áramerősség hányadosa, ahol  $i$  a képzetes egység és  $\omega=2\pi f$ ,  $f$  a mérő frekvencia. A komplex impedancia nagyságát és fázisszögét mértük meg, miközben a mintán a feszültség maximális értéke 1 V volt.

Méréseinkhez arannyal bevont 5 mm hosszú 0,6 mm átmérőjű réz tűket használtunk 2 elektródás elrendezésben, az elektródák közötti távolság 10 mm volt.

A frekvencia, a hőmérséklet és a mintaméret hatással van a dielektromos mérésre. Alacsony frekvencián a fellépő elektródpolarizáció az anyagi jellemzőkön túl zavarótényezőként hathat az eredményre, (Mészáros et al. (2003, 2005)) így az eredmények kiszámításához egy magasabb frekvenciát (10000 Hz-et) használtam fel. Az egész répaminták dielektromos tulajdonságát a kezelés előtt és a kezelés után is megmértem. A kezelt minták 1 cm-es korongjainak az impedanciáját újra megmértem, de most a háncs illetve a fa részen, ezzel átfogó képet kaptam a minta állományváltozásáról.

#### 4.5.5 Hagyományos penetrométeres mérés

A SMS (Stable Micro System) XTR-2A precíziós penetrométert használtam a répaminták keménységének mérésére. A hőkezelés után, szobahőmérsékletűre hűlt répaminta középrészéből 1 cm-es korongokat vágtam ki. A méréseket a vágókés-fejjel végeztem (9.ábra). A vágókés 0,1 mm/s sebességgel nyomódott a mintába. A penetrométer rögzítette az átvágás során fellépő erőt a deformáció függvényében. A kapott görbe segítségével meghatároztam a korong átvágásához szükséges maximális erőt. Az átvágás minden esetben a korong átmérője mentén történt.



**9. ábra:** A répakorongok átvágásához használt vágókés-fej

A kezelés hatására bekövetkező hőmérsékletkülönbségekből adódó hibák elkerülése érdekében az egyes kezeléseket után a mintákat hagytam szobahőmérsékletre lehűlni, és csak azután kezdtem el a vizsgálatokat. A minta variabilitásából adódó hibák kiküszöbölése érdekében a roncsolásmentes módszerek esetében relatív változást vettem figyelembe.

#### **4.6 In-vivo kísérletek akusztikus módszerrel**

A kísérlet során két paradicsomfajta Preciza és Boderine került vizsgálatra. A paradicsomok egy kistermelői fóliasátorban növekedtek. Mindkét fajtánál két tő paradicsomon 2-2 fürt bogyóit mértem meg, összesen 57 paradicsomot. A méréseket 2-3 naponta végeztem több, mint 2 hónapon keresztül.

Az akusztikus vizsgálathoz használt elrendezés annyiban különbözik a fejezet elején bemutatottól, hogy a mikrofon nem egy dobozba volt rögzítve, hanem szabadon mozgathattam. A kapott válaszjel értékelése a fent említett „Stiffness” nevű programmal történt.

Az adatok értékelése SPSS<sup>TM</sup> statisztikai, illetve Excel programmal történt. A bemutatott ábrákon a szignifikáns különbségek 95 %-os megbízhatósági szinten értendők.

## 5 EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

### 5.1 Az akusztikus módszer alkalmazhatósági körének bővítése

Ahogy az irodalmi áttekintésben is olvashattuk, az akusztikus módszer számos előnnyel rendelkezik, azonban nagy hátránya az, hogy csak gömbszerű, nagyjából homogén terményekre van kidolgozott elrendezés, illetve alkalmazási tapasztalat. Ez a módszer egy gyors és jól használható módszer, azonban a vizsgált terményre vonatkozó tulajdonságok leszűkítik az alkalmazhatóságának körét.

Ezért vizsgálatokat végeztem, hogyan, milyen feltételek mellett és milyen elrendezéssel lehet a vizsgálható termények körét bővíteni.

Az általam vizsgált termény a -ma Hungarikumként számon tartott- paprika volt. A hazánkban termesztett paprikák kiváló minőségűek, jó beltartalmi értékkel rendelkeznek és nem utolsó sorban finomak. Ebből kifolyólag nemcsak a hazai piacon kerülnek értékesítésre, hanem a külföldi boltok polcain is fellelhetők. A paprika nemcsak ezért különleges termény, hanem felépítése is speciális. E termény egyik fontos minőségi paramétere a keménység, aminek objektív meghatározására nincs elfogadott roncsolásmentes módszer.

#### 5.1.1 Mérési elrendezés vizsgálata

Legelőször azt kell megvizsgálni, hogy milyen mérés összeállítás használható és melyek azok a mérési körülmények, beállítások, amely segítségével a paprikára jellemző, tiszta hangválasz kapható.

A kapott válaszjelnek több feltételnek is meg kell felelnie. Mint például, hogy

- jól reprodukálható legyen,
- a jellemző csúcs megfelelően elkülöníthető legyen más rezgési csúcsoktól,
- kövesse a paprikaminta állományváltozását, tehát
- a kapott rezonancia frekvencia segítségével következtetni tudjunk a paprika keménységére.



10. ábra: Mérési elrendezés paprikára

A vizsgálataim alapján azt az összeállítást találtam a legmegfelelőbbnek, amikor a mikrofon a paprika száránál helyezkedik el. (10. ábra)



A mérések során figyelmet kell fordítani arra, hogy a paprika szára ne érjen a mikrofonhoz, mert akkor az akadályozhatja a kialakuló rezgéseket.

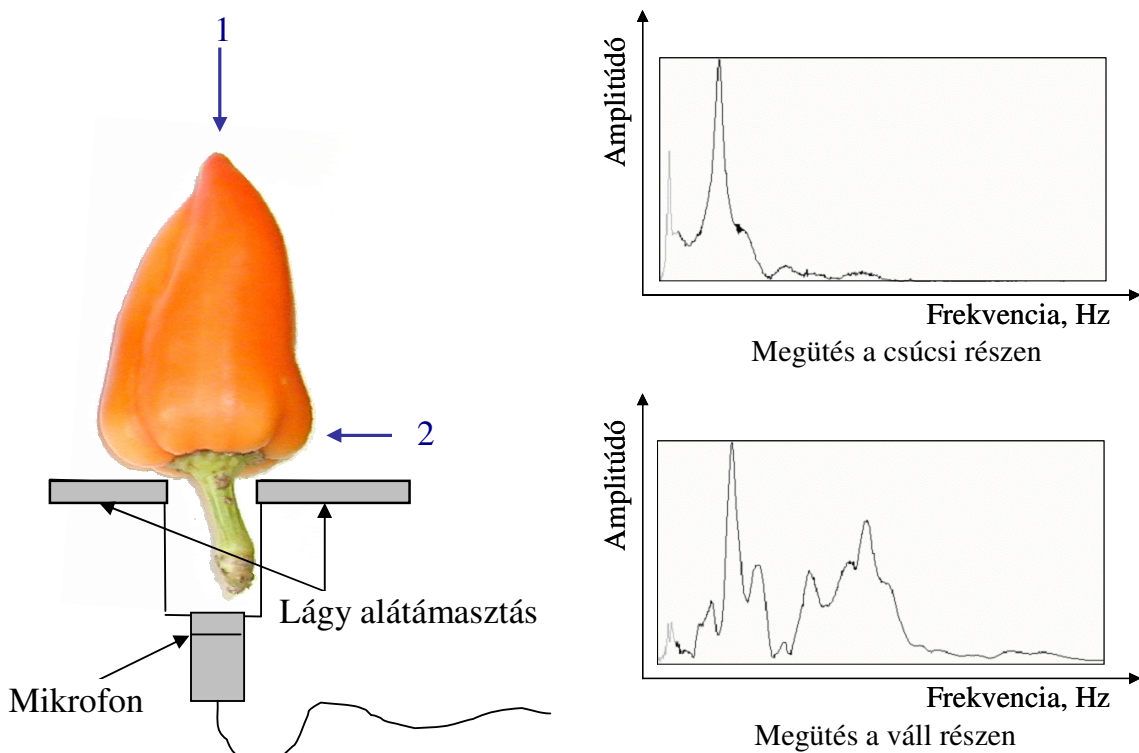
Meg kell jegyeznem, hogy az általam használt mérési elrendezéssel csak a kúpos paprikák vizsgálhatók, mert ez a mérési elrendezés nem tartja stabil pozícióban a görbült mintákat.

#### 5.1.1.1 A megfelelő gerjesztési pont kiválasztása

Ezek után automatikusan felvetődik a kérdés, hogy a *termény mely pontját gerjesszük?*

Következő lépésben megvizsgáltam, hogy a paprika mely pontját megütve (gerjesztve) kapom a legegységelműbb jelet, amely megfelelően reprodukálható.

A paprika esetében két megütési pontot vizsgáltam: a csúcsi, illetve a váll részen. A kiválasztott gerjesztési pontok (csúcsi rész (1), váll rész (2)) megütése során kapott hangválaszokat a 11. ábra bemutatja be.



**11. ábra:** A paprika különböző pontjainak megütésére adott hangválasz spektruma

A 11. ábrán látható, hogy a kapott hangválaszban a paprika jellemző frekvenciája jól detektálható, világosan elkülöníthető a többi frekvencia csúcstól. Az is megfigyelhető, hogy a paprika csúcsi részének megütésekor kapott spektrumban egyetlen domináns csúcs látható, míg a váll rész megütésével egyéb rezgési módok frekvenciái is megjelennek a spektrumban. A váll illetve a csúcsi rész gerjesztésével nyert rezonancia frekvencia értékek szignifikáns különbséget nem mutattak, tehát mindkét esetben ugyanazt a jellemzőt mérjük. A könnyebb detektálhatóság miatt, a csúcsi rész

megütésével kapott rezonancia frekvencia értéket javaslom a paprika akusztikus vizsgálatával történő keménységbecsléshez.

A kapott jel mellett, hogy egyértelmű és jól detektálható, megfelelően reprodukálható is, tehát alkalmas lehet a paprika keménységének mérésére.

### **5.1.2 Paprika állományváltozásának követése akusztikus módszerrel**

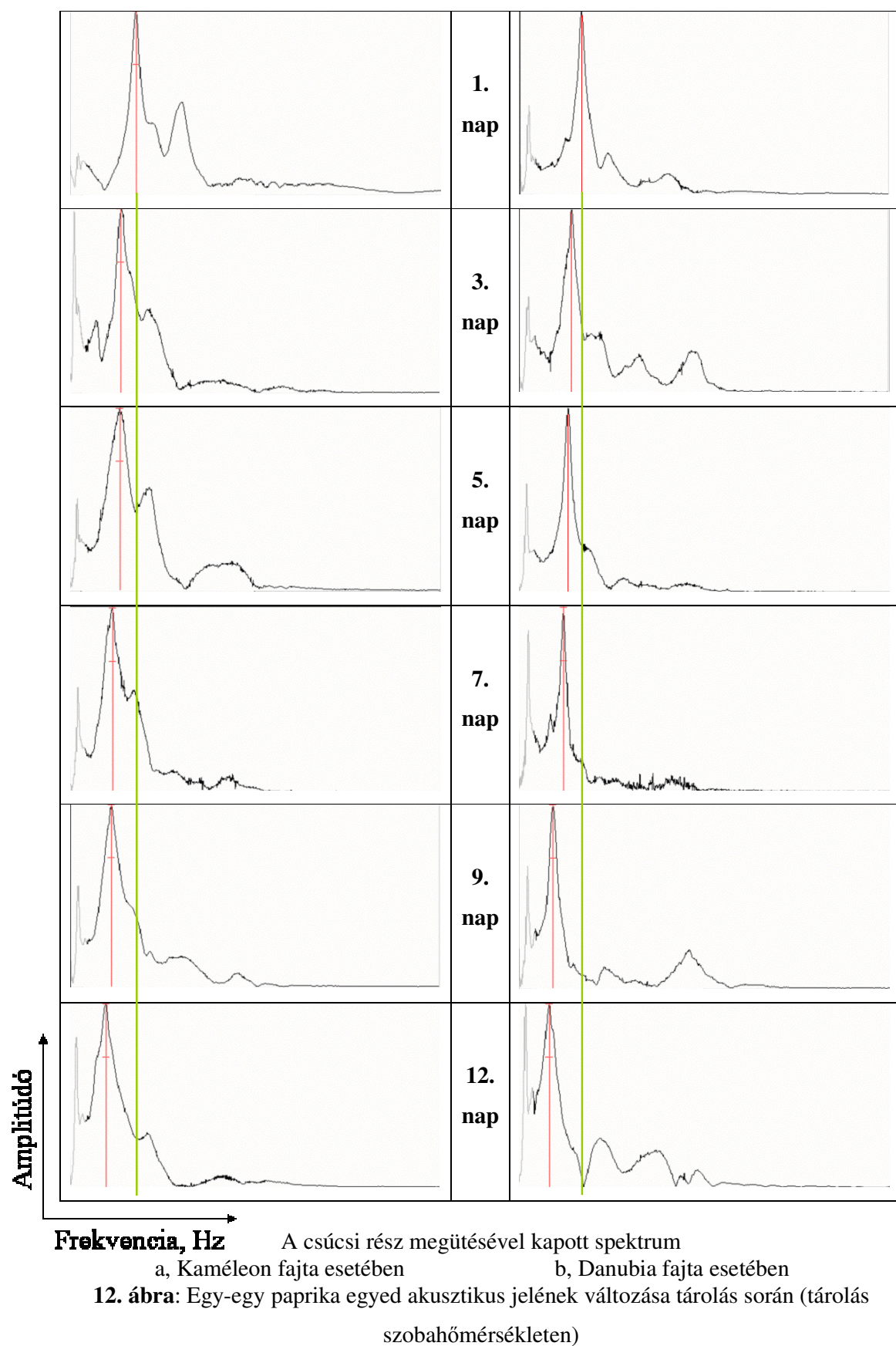
Az, hogy létezik egy elrendezés, amivel jól reprodukálható, tiszta jelet kaphatunk, még nem elég bizonyíték arra, hogy ezzel a mérési összeállítással kapott frekvencia segítségével mérhető a paprika keménysége. Ennek bizonyítása érdekében tárolás során vizsgáltam a paprika keménységváltozását.

Ignát és tsai (2003, 2003a), Tompos és tsai (2003), illetve Istella és tsai (2003) kutatásai alapján az ütésvizsgálati módszer alkalmas a paprika keménységváltozásának követésére tárolás során. Tehát az ütésvizsgálati módszerrel mért eredmények alapján következtethetünk a tárolás során bekövetkező változásokra, amely útmutatást adhat az akusztikus mérés eredményeinek értelmezéséhez.

A vizsgálatokhoz 5 fajta paprikát használtam fel. Az első kísérletben a mintákat a gyors változás érdekében, csomagolás nélkül közel két hétig szobahőmérsékleten tároltam, míg a másik kísérletben a minták 18 °C-on, hűvös pincében két hétig kerültek tárolásra. A kísérlet során a méréseket ugyanazon a paprika egyedek, ugyanazon pontján végeztem el.

Az akusztikus módszerrel a paprikamintákat két különböző helyen, a csúcsi és a váll részen ütöttem meg, míg az impact ütésvizsgálati módszerrel történő mérés során a bogyók váll, illetve oldal részének keménységét vizsgáltam. Az ütésvizsgálati módszernél azért választottam a váll részt az első megütési pontnak, mert tapasztalataim alapján a tárolás alatt bekövetkező puhulás ott jelentkezik először. Az akusztikus vizsgálatához hasonlóan a másik mérési pontnak a csúcsi részt kellene választanom, azonban ebben az esetben ez nem célszerű. Azért, mert a paprika csúcsi része kb. 1-2 mm átmérőjű, míg a kalapácsfej átmérője kb. 10 mm; a felületekben lévő nagyságrendi különbség (a kalapács javára) kevésbé megbízhatóvá teszi a kapott eredményeket, arról nem beszélve, hogy megnövekedik a minta sérülésének esélye. Ellentétben az előbbiekkal az akusztikus vizsgálat esetében ez az 1-2 mm átmérőjű felület megfelelő méretű gerjesztési helynek és ez a kis impulzusú megütés a paprika csúcsi részében semmilyenféle kárt nem tesz.

A 12. ábra az általam vizsgált öt fajtaból, két paprikafajta egy-egy kiválasztott egyedének akusztikus jel-változását mutatja a 12 napos szobahőmérsékleten történő tárolás során. A piros vonal a jellemző frekvenciacsúcs értéket mutatja. A csúcs balra tolódása, azaz a frekvencia csökkenése a termény puhulását jelenti. A könnyebb értelmezés érdekében az első napi frekvencia értéket minden egyes mérési nap estében zöld színnel bejelöltem.



A képek alapján a következők állapíthatók meg:

- A spektrum jelleg és a jellemző rezonancia frekvencia időbeli változása hasonló volt az egész kísérlet során.
- A spektrumok közel azonos alakjából következtethetünk arra, hogy minden egyes mérési napon ugyanaz a frekvencia csúcs került regisztrálásra, ami bizonyítja azt, hogy a megütési pont gerjesztésével kapott jel jól reprodukálható.
- Az ábrán az is megfigyelhető, hogy a másfajta rezgésekből adódó egyéb csúcsok is szisztematikusan változnak a tárolás során.
- A minták rezonancia frekvenciái monoton csökkenést mutattak az idő előrehaladtával.
- Ez a csökkenés valószínűleg a paprikák puhulását tükrözi.

Mindkét kísérletben résztvevő összes paprikafajta, mind a váll, mind a csúcsi részt gerjesztve a fent említett tulajdonságokat produkáltak.

### **5.1.3 A paprika test puhulás alatti frekvenciaváltozásának vizsgálata modellezéssel**

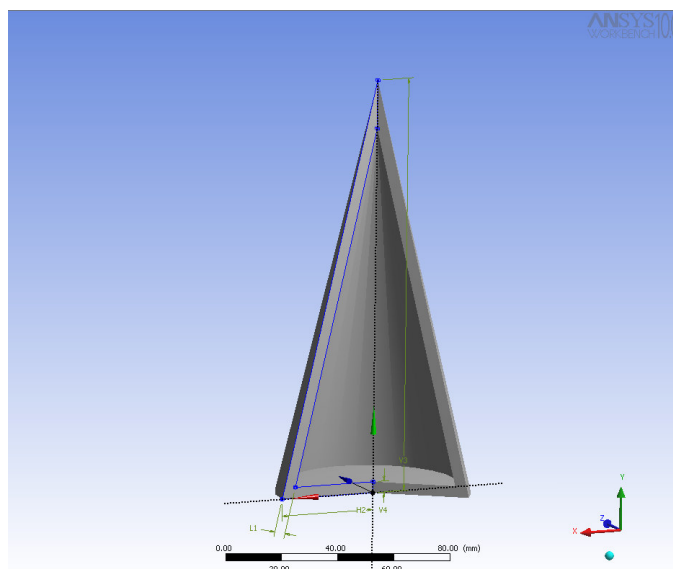
Az előzőekben leírt frekvenciaváltozásokat mérések során tapasztaltam. A gyakorlatban szerzett megfigyelés újabb oldalról való megerősítésére jó eszköznek kínálkozik a végeelem modellezés.

A modellezéshez az Ansys 10.0, végeelem modellező programot használtam. A vizsgálat során módus analízist végeztem, ami egy numerikus folyamat, melynek segítségével a modell természetes frekvenciáit és mód alakjait (rezgés alatti deformációs jellemzőit) számítja ki a program.

#### **5.1.3.1 A modell létrehozása**

A paprika több szempontból is különbözik az eddig vizsgált terményektől: nem gömb, hanem kúp alakú és nem homogén termény, hanem egy felfújott bogyó. A puhulás alatti frekvenciaváltozás vizsgálatához az első lépés a megfelelő geometria létrehozása.

Egy nagyon leegyszerűsített paprika modellt, egy üreges kúpot használtam a szimulációk elvégzéséhez. A paprika húst homogén, elasztikus, lineáris anyagnak tekintettem, ami szintén a valódi összetett (folyadékkal teli sejtek, erek) paprikahús leegyszerűsítése, azonban teljes mértékben megfelel ez a modell a paprika test keménységére és a kialakult rezonancia frekvencia közötti összefüggés vizsgálatára. A modellezéshez használt objektumot metszetben a 13. ábra mutatja be.

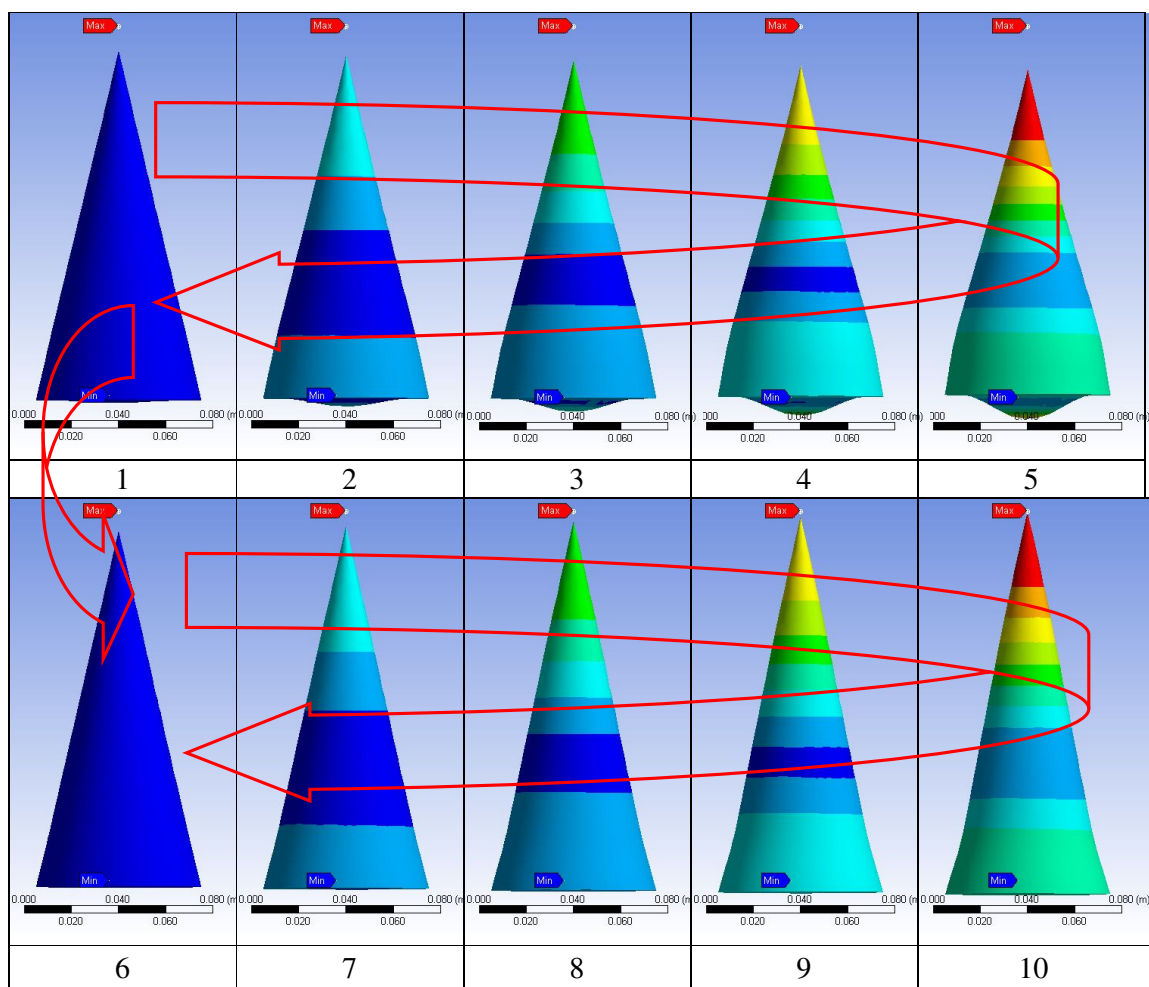


**13. ábra:** A leegyszerűsített paprika modell metszetben

### 5.1.3.2 A modell rezgéselemzése

A geometria létrehozása után a rezgéselemzés következett. A modell egyes pontjainak rezgéseit nem korlátoztam, tehát nem rögzítettem egyetlen egy pontját sem, minden pont elmozdulhatott x, y és z irányba, azaz 3 szabadsági fokkal rendelkezett. Az objektum első 30 módalakját számítottam ki a programmal.

A szabadsági fokoknak, így a szabad rezgésnek köszönhetően az első hat mód 0 Hz körüli frekvencia értéket adott, ami megegyezik Jancsók et al. (2001a) cikkében leírt megfigyeléssel. Ahhoz, hogy a paprika rezonancia frekvenciaváltozásáról többet tudhassunk meg, a program által kiszámított módalakok közül ki kell választanunk azt a rezgéstípust, ami valószínűleg létrejön a mérés során. A módalakok elemzését a rezgés hatására bekövetkező deformációk vizsgálatával végeztem. A módalak kiválasztásánál azt vettem figyelembe, hogy a paprikacsúcs megütésével hozzuk rezgésbe a mintát; a jel detektálása, pedig az ellentétes oldalon a szár felőli részen történik. Így olyan rezgési módot kerestem, ahol a rezgés végigfut a paprika test csúcsától a szár részig. Ilyen típusú rezgés az általam létrehozott modell esetében a 21. módus volt. Ezt a rezgést a 14. ábra mutatja be. Az ábrán a különböző színek a különböző mértékű deformációt jelentik (a piros a legnagyobb, míg a kék a legkisebb mértékűt).



**14. ábra:** A paprika bogyó rezgéseit leíró módalak (21. módus)

A rezgés során az objektum hosszirányban összenyomódik, míg ezzel egyidejűleg sugár irányban kiszélesedik (1-5), ezután visszaalakul az 1-es képen bemutatott alakba. Majd sugár irányban nyomódik össze, és hosszirányban nyúlik meg (6-10).

Ez a rezgési típus ugyanazt a deformációt mutatja, mint a gömbszerű alakok vizsgálatánál használt lélegző vagy gömb mód.

Feltételeztem továbbiakban, hogy ez a módalak megfelelő a paprika akusztikus vizsgálata közben létrejövő rezgés leírására.

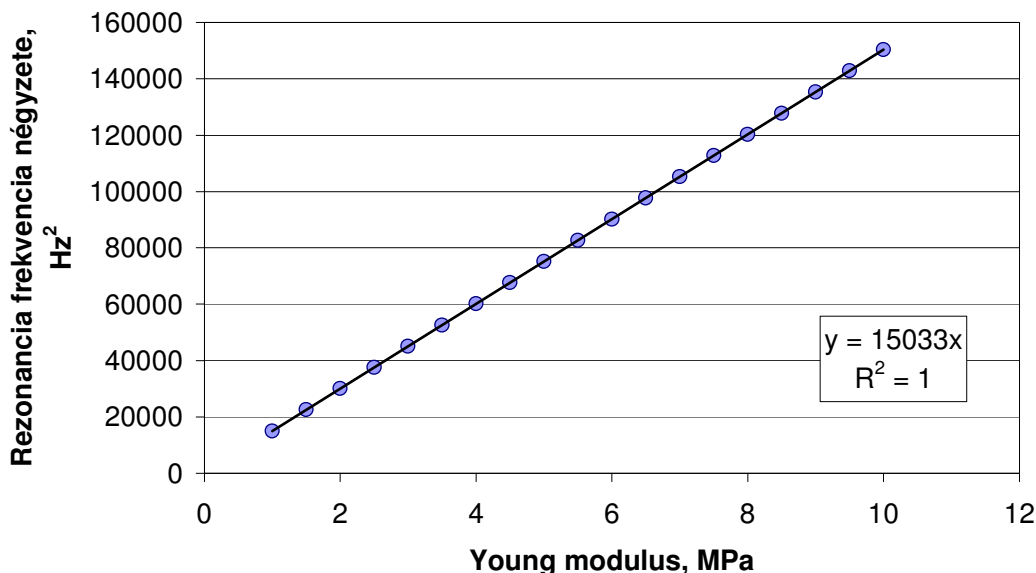
### 5.1.3.3 A rezonancia frekvencia függése az objektum keménységétől

Az akusztikus keménységtényezők egyik legfontosabb és legjellemzőbb paramétere a termény rezonancia frekvenciája, hiszen az akusztikus módszer azon a megfigyelésen alapul, hogy a termény rezonancia frekvenciája változik a termény puhulásával.

Ezért megvizsgáltam, hogy hogyan függ a kapott rezonancia frekvencia a paprika modell keménységétől, tehát Young modulusától. Különböző keménységű (Young modulusú) mintákat



generáltam és figyeltem az általam kiválasztott módalakhoz tartozó rezonancia frekvencia változását. A 15. ábra mutatja be a Young modulus-változás hatását a rezonancia frekvenciára. A jobb láthatóság kedvéért a frekvencia értékek négyzetét ábrázoltam a diagramon a Young modulus függvényében.



**15.ábra:** A rezonancia frekvencia négyzete a Young modulus függvényében

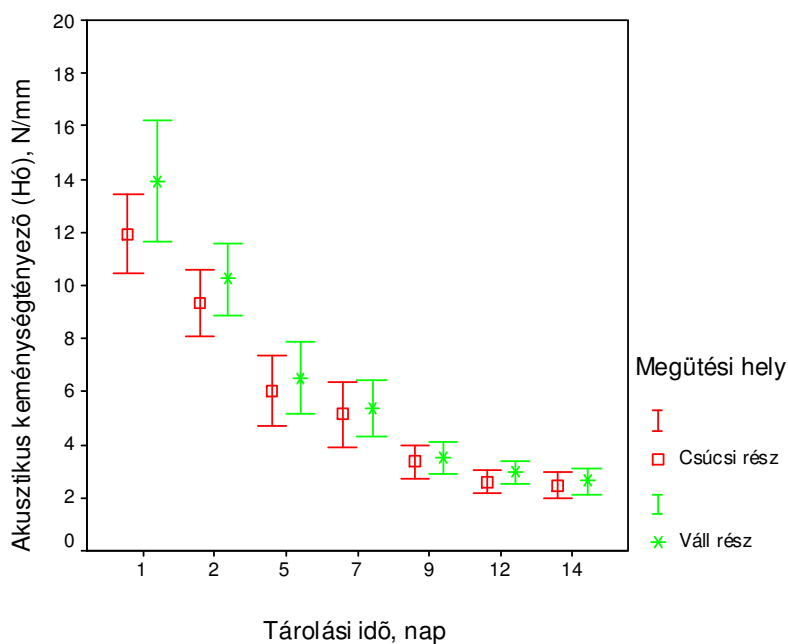
Az ábrán látszik, hogy a kapott pontokra tökéletesen illeszthető egy egyenes, ami azt jelenti, hogy a rezonancia frekvenciaváltozása ilyen alaknál is jellemzi a termék keménységváltozását. Továbbiakban az is megfigyelhető, hogy a rezonancia frekvencia négyzetesen függ a Young modulustól, tehát a paprika esetében is  $S \sim f^2$ -tel. Ezek tudatában elmondható, hogy a rezonancia frekvenciával jellemezhető a paprika tárolás alatti keménységváltozása.

A paprika akusztikus keménységének becsléséhez a kapott rezonancia frekvenciát korrigálni kell a terményre jellemző tömeggel vagy nagysággal. Erre a göbszerű terményeknél is használt mintatömeget javaslom praktikus mivolta miatt. Továbbiakban ezért a kapott akusztikus keménységtényezőt az  $S = f^2 \cdot m$  összefüggéssel számítottam ki.

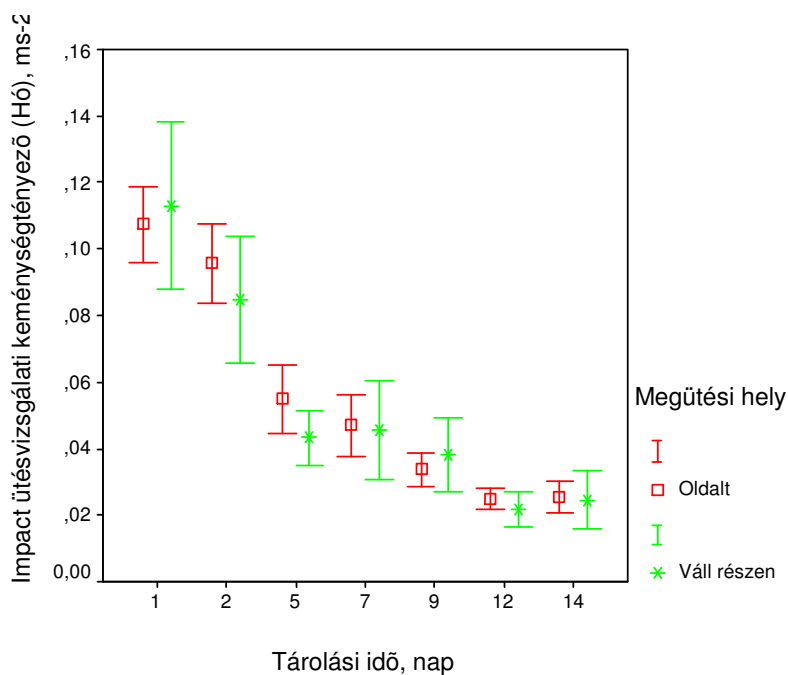
#### 5.1.4 A paprika tárolás alatti puhulása

A 16. ábra bemutatja az akusztikus keménységtényező változását tárolás során Hó fajta esetében. A gerjesztési pontok vizsgálatánál történt megfigyelésemet -miszerint nincs szignifikáns különbség a két pont megütésével kapott rezonancia frekvencia között- igazolja az ábra, hiszen a számított akusztikus keménységtényező sem mutat szignifikáns különbséget a csúcsi illetve a váll rész megütésével.

Az impact módszerrel mérve sem volt szignifikáns különbség a paprika váll részének, illetve oldalának felületi keménysége között (17. ábra). Ezért a következőkben mindkét mérési módszer esetében csak az egyik gerjesztési illetve megütési pont vizsgálatával kapott ábrát mutatom be (18-19. ábra). A többi fajta csúcsi illetve váll (akusztikus vizsgálat), oldal és váll (ütésvizsgálati módszer) rész vizsgálatával kapott diagramok a Mellékletben található (72-79. ábra).



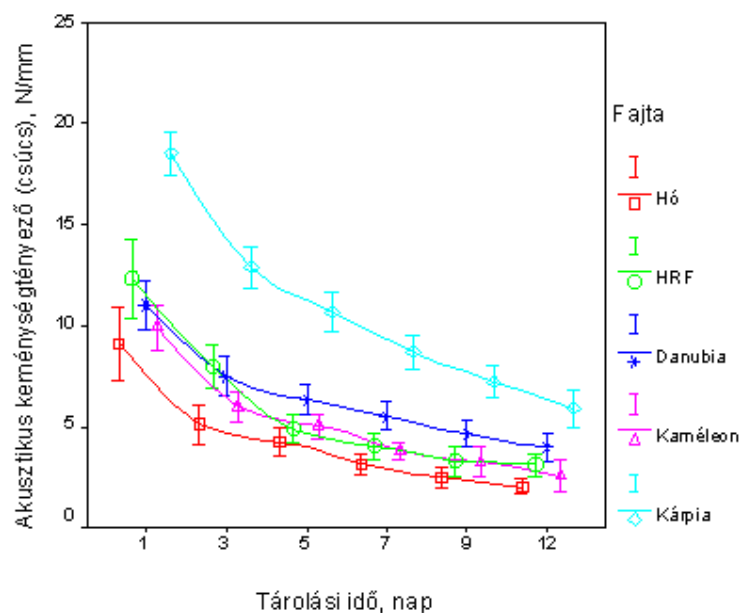
**16. ábra:** Az akusztikus vizsgálat eredménye Hó fajta esetében (tárolás 18 °C-on)



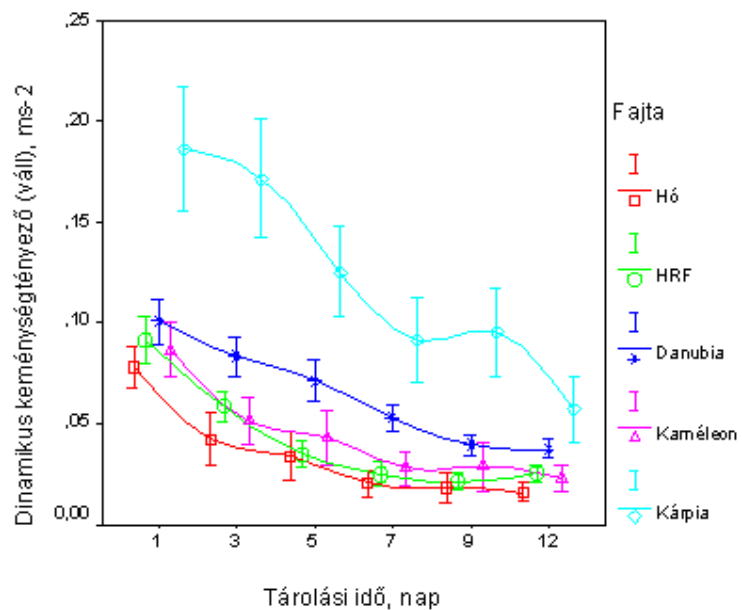
**17. ábra:** Impact ütésvizsgálat eredménye Hó fajta esetében (tárolás 18 °C-on)



A különböző paprikafajták tárolás során bekövetkező keménységváltozását mutatja be a 18. és a 19. ábra.



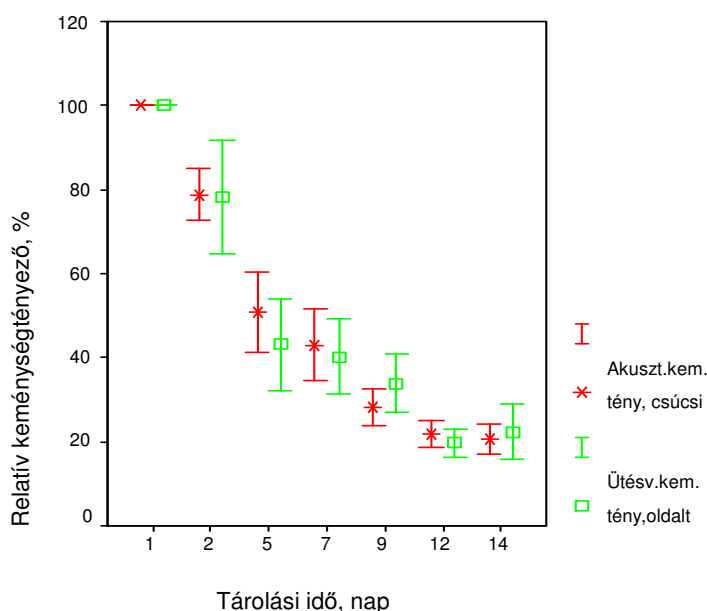
**18. ábra:** A paprikafajták akusztikus keménységtényezőjének változása a kísérlet során (megütés a bogyó csúcsi részén, szobahőmérsékleten való tárolás során)



**19. ábra:** A paprikafajták ütészvizsgálati keménységtényezőjének változása a kísérlet során (megütés a bogyó vállrészén, szobahőmérsékleten való tárolás során)

Az ábrákon látható, hogy a paprikaminták puhulása nagyon hasonló tendenciát követett mindkét módszerrel mérve. Érdekes megfigyelni a két módszerrel kapott keménységeredmények közötti nagyfokú hasonlóságot (18-19. ábra). Mindkét módszer különbséget tudott tenni a paprikafajták

között. Mindkét módszer szignifikánsan keményebbnek találta a Kárpia fajtát a többi fajtához képest. Mindkét mérési módszerrel a Kárpia kezdeti keménysége kb. kétszer akkora volt, mint a többi fajtáé, tehát nemcsak a sorrend, hanem a paprikák egymáshoz viszonyított keménységaránya is nagyon hasonló volt. Mindkét módszerrel mérve a paprikaminták keménysége a tárolás ideje alatt a kiindulási keménységhez képest kevesebb, mint felére csökkent, tehát a mért változások is nagyon hasonló mértékűek voltak. A két módszerrel kapott eredmény százalékos változását mutatja be a tárolási idő függvényében a 20. ábra Hó fajta esetében.



**20. ábra:** Relatív akusztikus és ütésvizsgálati keménységtényező változása a tárolás során (Hó fajta esetében)

A két módszer közötti összefüggést, az adatok korrelációs koefficiensét a szobahőmérsékletű tárolás esetében a 4. táblázat mutatja be.

A szokatlanul jó összefüggés az akusztikus és az ütésvizsgálati módszerrel kapott keménységek között véleményem szerint annak köszönhető, hogy jelen esetben a paprika globális keménysége szinte teljesen megegyezik a paprika felületi keménységével. Ez abból következik, hogy a paprika nem tömör, hanem üreges, így a mérések során mindkét módszerrel a néhány milliméter vastag paprikahús került mérésre.

**4. táblázat:** A két roncsolásmentes módszerrel mért keménységjellemzők korrelációs koefficiensei (szobahőmérsékletű tárolás esetében)

Hó	Akuszt. kem. tény. csúcsi rész	Akuszt. kem. tény. váll rész
Ütésv. kem. tény. váll rész	0,8922	0,9047
Ütésv. kem. tény. oldalt	0,8247	0,8433

HRF	Akuszt. kem. tény. csúcsi rész	Akuszt. kem. tény. váll rész
Ütésv. kem. tény. váll rész	0,7736	0,7449
Ütésv. kem. tény. oldalt	0,7312	0,7219

Danubia	Akuszt. kem. tény. csúcsi rész	Akuszt. kem. tény. váll rész
Ütésv. kem. tény. váll rész	0,8624	0,8121
Ütésv. kem. tény. oldalt	0,8225	0,7995

Kaméleon	Akuszt. kem. tény. csúcsi rész	Akuszt. kem. tény. váll rész
Ütésv. kem. tény. váll rész	0,7561	0,6868
Ütésv. kem. tény. oldalt	0,7688	0,7864

Kárpia	Akuszt. kem. tény. csúcsi rész	Akuszt. kem. tény. váll rész
Ütésv. kem. tény. váll rész	0,7264	0,7721
Ütésv. kem. tény. oldalt	0,7184	0,765

Ha elfogadjuk Ignát és tsai (2003, 2003a), Tompos és tsai (2003) illetve Istella és tsai (2003) eredményeit –ami azt mondja, hogy a paprika felületi keménységváltozása vizsgálható ütésvizsgálati módszerrel- akkor az előbbieken bemutatott ábrák alapján elfogadhatjuk azt is, hogy az akusztikus módszerrel mért keménység a paprika keménységváltozását mutatja. A két módszer közötti hasonló jegyek arra engednek következtetni, hogy mindkét módszerrel a paprikabogyó ugyanazon tulajdonsága került vizsgálatra. Ebből az is következik, hogy a hagyományosan használt  $f^2 \cdot m$ -es összefüggéssel számított keménységeredmény használható az egyedi paprikaminták keménységváltozásának követésére.

Az, hogy mind a két keménységmérő módszerrel vizsgálni tudjuk a paprikák tárolás alatti puhulását, lehetőséget biztosít a különböző fajták pulton tartásának vizsgálatára. Ez segítségünkre lehet a fajták kiválasztásában aszerint, hogy hamar, rövid idejű tárolás után kerül ki a termény a boltok polcaira, vagy hosszabb szállítást, így több napos plusztárolást igénylő piacokra (pl. exportra) szállítják.

Az előzőekben ismertetett akusztikus kísérletek eredményei alapján megállapítható, hogy az általam beállított környezetben a módszer jó reprodukálhatóságot mutat paprika esetében is. Az  $f^2 \cdot m$  összefüggés -amit a nagyjából gömbszerű és homogén termékeknél használnak- egyedi paprikaminták keménységváltozásának követésére is alkalmas. A kapott akusztikus jel jellemző frekvenciacsúcsa jól elkülöníthető a többi frekvencia csúcstól. Mivel a váll, illetve a csúcs megütése során kapott akusztikus keménységtényezők között nincs szignifikáns különbség és a csúcs megütésével kapott spektrumban egyetlen egy domináns csúcs látható, ezért a paprika akusztikus keménységtényezőjének meghatározásánál a paprika csúcsi részét célszerű megütni. Végeelem modellezés eredményei is megerősítették, hogy a paprika keménységváltozást tükrözi a minta rezonancia frekvenciaváltozása és a két paraméter közötti összefüggés négyzetes. A fent ismertetett tárolási kísérlet eredményeit bemutató ábrák igazolják, hogy az akusztikus vizsgálat megfelelő módszer a paprika keménységének vizsgálatára és jól követi a tárolás során bekövetkező puhulást.

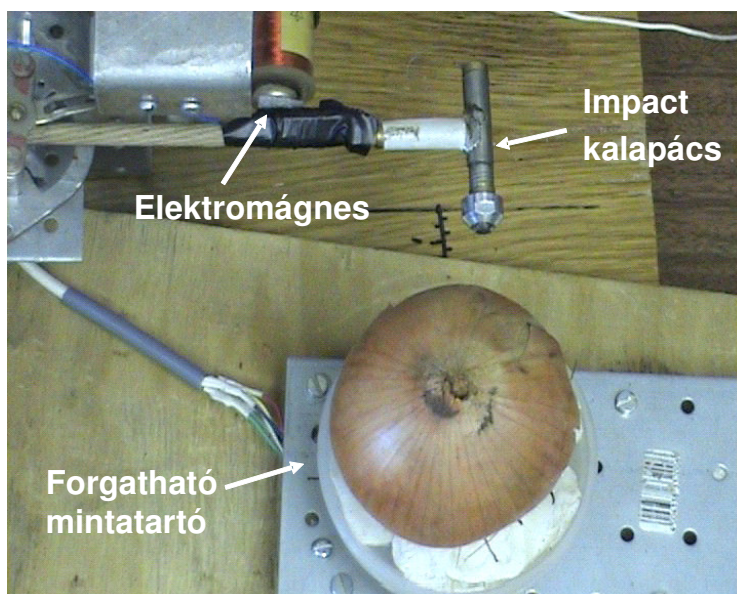
## 5.2 Nyitott kérdések a dinamikus keménységmérésben – metodikai vizsgálatok

Napjainkban egyre nagyobb teret hódítanak a dinamikus állománymérési módszerek. Ezek a módszerek gyorsak, ezért válogatósorba építhetők és a roncsolásmentességből fakadóan alkalmasak egy termény többszöri vizsgálatára. Ezek közé a módszerek közé tartozik az ütésvizsgálati vagy impact módszer is. Az irodalmi feldolgozásban ismertetett előnyös tulajdonságaik miatt már elég régóta, a '80-as évektől kezdve foglalkoznak e módszerrel. Világszerte számos kutatócsoport használja az ütésvizsgálati módszert zöldségek, gyümölcsök felületi keménységének meghatározására, de számos nyitott kérdés van még e témakörben. Ahhoz, hogy ez a módszer szabványosítható legyen, illetve a különböző kutatócsoportok által használt egyedi ütésvizsgálati műszerekkel kapott mérési eredmények összehasonlíthatók legyenek fontos vizsgálni, mely mérési paraméterek hatnak a kapott keménységtényezőre.

Feltételezésem szerint a mérési körülmények közül a következők befolyásolhatják az ütésvizsgálati keménységtényezőt:

- a kalapács sebessége
- az ütőfej alakja
- az ütőfej anyaga
- a minta hőmérséklete
- a kalapács tömege.

Ahhoz, hogy ezek a vizsgálatok elvégezhetőek legyenek a Budapesti Corvinus Egyetem Élelmiszertudományi Karának Fizika-Automatika Tanszékén egy számítógéppel vezérelhető automatikus impact mérőrendszert fejlesztettek ki. A 21. ábrán felülnézetből láthatjuk a műszert.



**21. ábra:** Számítógéppel vezérelhető automatikus ütésvizsgálati műszer

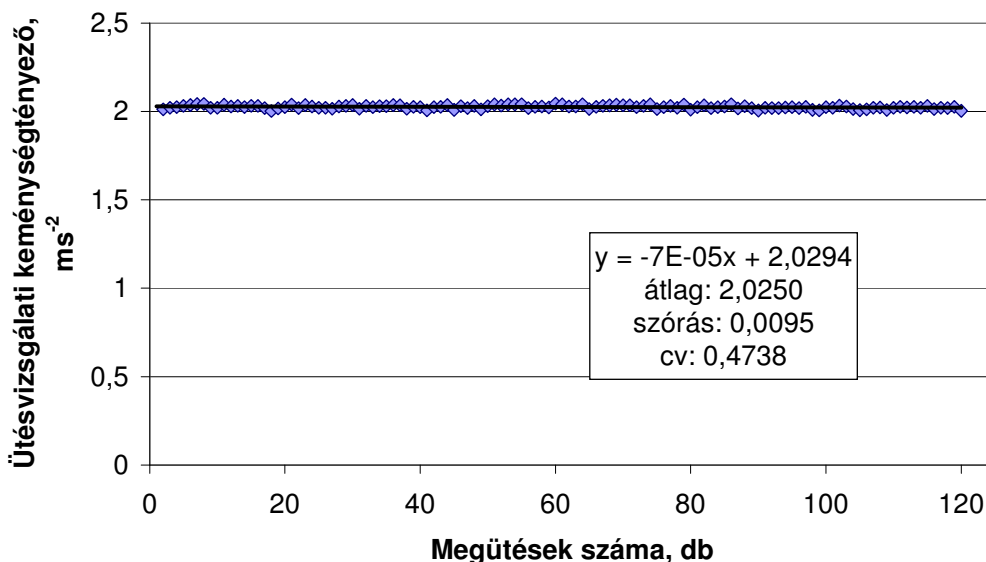
Nemcsak a műszer hardveres része hanem, a mérés során kapott jel rögzítésére és elemzésére szolgáló szoftver fejlesztése is a Tanszéken történt.

A kalapácsban egy gyorsulásérzékelő található és a mintával érintkező kalapácsfej tetszőlegesen cserélhető. A kalapácsot egy elektromágnes tartja a kiinduló pozícióban és a mozgása egy függőleges tengely körül, vízszintes síkban történik. A kalapácsnak a termény megütéséhez szükséges energiát egy rugó szolgáltatja. Nemcsak a megütés automatikus, hanem a szoftver jelrögzítéséhez szükséges vezérlést is a számítógép végzi, így a megütéssel kapott görbe jellemző pontja automatikusan elmentésre kerül. A megütés-mérés után az elektromágnes ismét aktív lesz és a kiindulási helyzetbe húzza vissza a kalapácsot.

A termény egy forgatható mintatartón helyezkedik el. A minta egy pontjának megütése után a mintatartó pontosan  $6^\circ$ -ot fordul el. Ezt a mozgást is a számítógép irányítja. A mintatartó 60 lépés ( $360^\circ$ ) megtétele után pontosan a kiindulási pozícióba áll vissza, így lehetséges egy termény pontosan ugyanazon pontjának többszöri megütése, vizsgálata. A mintatartó helyzetének változtatásával a termény és a kalapács közötti távolság is állítható.

### 5.2.1 A fejlesztett műszer alkalmasságának vizsgálata

A vizsgálatok elkezdése előtt az automatikus műszert kellett megvizsgálnom, hogy alkalmas-e a kis változások kimutatására. Ezért reprodukálhatósági vizsgálatot végeztem modell anyagon. A kapott eredményt a 22. ábrán láthatjuk.

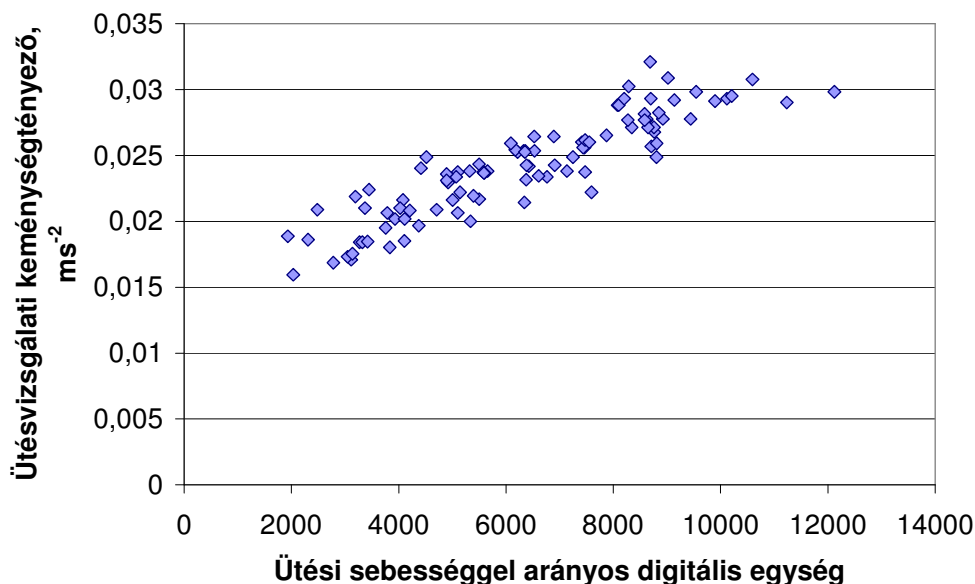


22. ábra: Reprodukálhatósági vizsgálat modell anyagon (pingpong labda)

A modell anyag -jelen esetben pingpong labda- egy pontja 120-szor került megütésre és a kapott jellemzőkből számított ütésvizsgálati keménységtényezőt ábrázolja a diagram. Látható, hogy az

egyes megütéshez tartozó keménységértékek százalékos szórása 0,5 % alatt van. Tehát nagyon jó reprodukálhatóságot mutat az új műszer.

Nézzük meg, milyen feltételnek kell még megfelelnie a műszernek ahhoz, hogy pontosan mérhessük a minták keménységét. A zöldségek, gyümölcsök viszkoelasztikus testek, így szükséges vizsgálni, hogy a megütés sebessége hatással van-e az ütésvizsgálati keménységtényezőre. A következő ábra (23. ábra) egy viszkoelasztikus tulajdonságot mutató modell anyag ütésvizsgálati keménységtényezőjének változását mutatja a megütési sebesség függvényében.

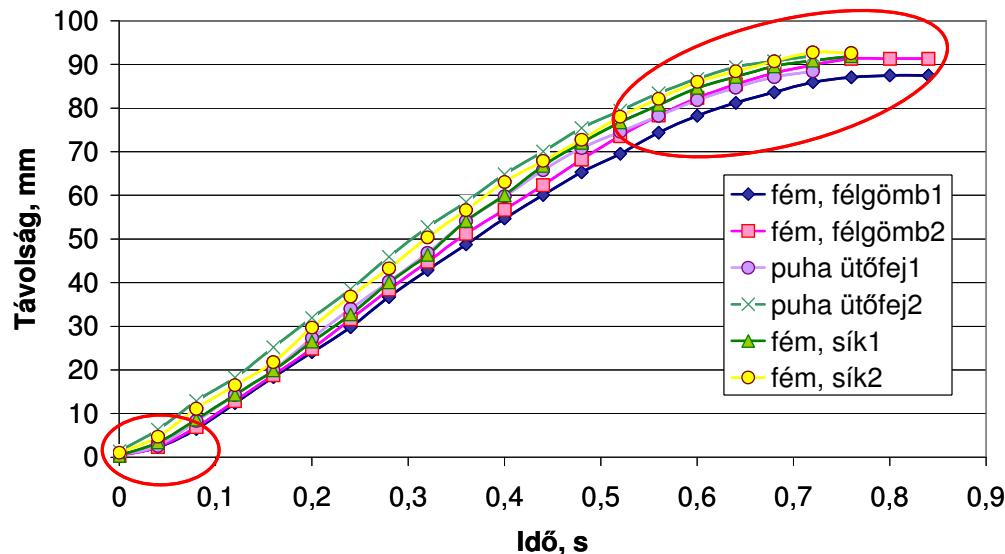


**23. ábra:** Az ütésvizsgálati keménységtényező és a megütési sebesség közötti kapcsolat egy viszkoelasztikus test esetében

A 23. ábra mutatja, hogy az ütésvizsgálati keménységtényező értéke függ a megütési sebességtől - köszönhetően a viszkózus tulajdonságuknak. Az is látható, hogy nagyobb megütési sebességnél magasabb ütésvizsgálati keménységtényezőt mérhetünk. Tehát egyre nagyobb megütési sebességnél egyre keményebbnek mérjük a mintát. Ez a tulajdonság a biológiai anyagoknál nem kiküszöbölhető, tehát a megfelelően pontos mérésekhez a kalapács sebességének közel állandónak kell lennie.

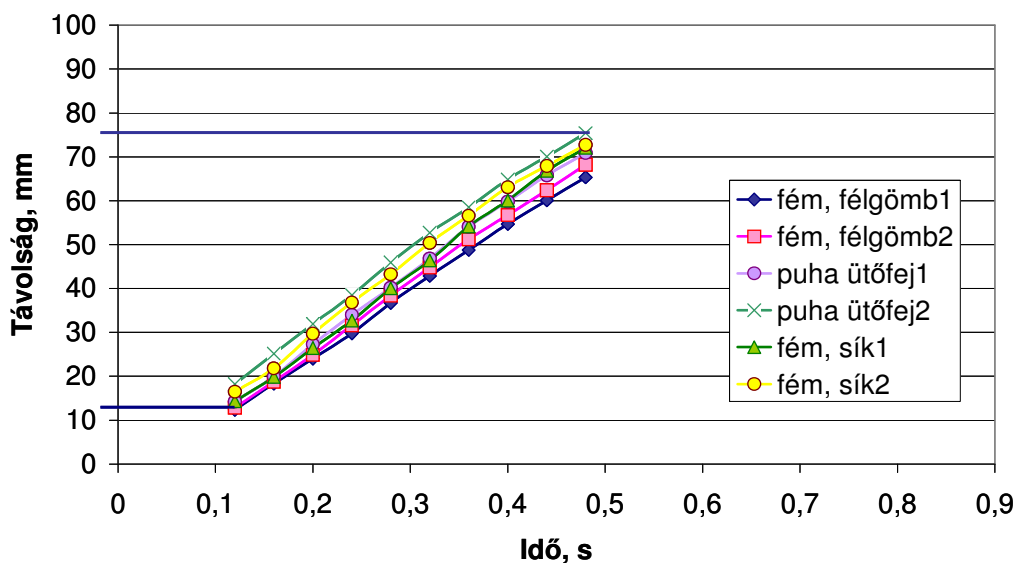
Ilyen irányú vizsgálatokat is végeztem. A kalapács mozgását digitális kamerával rögzítettem, majd a kapott felvételeket képkockánként elemeztem. Minden képkockán meghatároztam a kalapács pontos pozícióját. A kalapács pozíciójának változása és a képkockák rögzítése között eltelt idő ismeretében a kalapács sebessége kiszámítható. Ezt a sebességváltozást mutatja a 24. ábra. Mindhárom általam használt mérőfejjel (fém félgömb, fém sík kialakítású és puha ütőfej) többször is elvégeztem a vizsgálatot. Azért tartottam fontosnak a különböző alakú mérőfejekkel vizsgálni a kalapács sebességét, mert a mérőfejek tömege között 1-2 g különbség volt. Ezért a kalapács

sebessége a különböző mérőfejekkel módosulhat, mivel az ütéshez szükséges energiát egy rugó szolgáltatja. Az ábrán mérőfejenként két párhuzamos mérés eredménye látható.



**24. ábra:** Az automatikus impact mérőrendszer kalapácsának elmozdulása az idő függvényében

A görbe piros ellipszissel jelölt részén -tehát a mozgás kezdetén és végén- megfigyelhető, hogy a kalapács sebessége változik. Ez a rész az általam meghatározni kívánt változások pontos mérésére nem alkalmas. Van a görbéknek, azonban egy lineáris szakasza, mikor a sebesség közel állandó. (25. ábra)



**25. ábra:** A kalapács elmozdulása az idő függvényében



Ezt az is mutatja, hogy a görbe alsó és felső szakaszának eltávolítása után a vizsgált szakaszra egyenes illeszthető. Az adatokra illesztett egyenesek egyenletei az 5. táblázatban láthatók. A kalapács sebességét az egyenesek meredeksége mutatja, mm/s mértékegységben.

**5. táblázat:** A kalapács mozgására illeszthető egyenesek egyenletei

Mérőfej	Egyenlet	Determinációs együttható
<b>Fém, félgömb kialakítású fej 1</b>	$y = 149,18x - 5,4482$	$R^2 = 0,9993$
<b>Fém, félgömb kialakítású fej 2</b>	$y = 155,75x - 5,7375$	$R^2 = 0,9991$
<b>Puha ütőfej 1</b>	$y = 160,57x - 4,8649$	$R^2 = 0,9987$
<b>Puha ütőfej 2</b>	$y = 160,66x - 0,0652$	$R^2 = 0,9977$
<b>Fém, sík kialakítású fej 1</b>	$y = 164,67x - 6,1175$	$R^2 = 0,9991$
<b>Fém, sík kialakítású fej 2</b>	$y = 160,87x - 2,3654$	$R^2 = 0,9965$

Az illesztés jóságát a determinációs együtthatók 1-hez nagyon közeli értéke is mutatja. Az egyenesnek tekinthető szakasz két végpontjának y tengelyre való levetítése után megállapítható, mely az a minta és kalapács közötti távolság, ahol a kalapács állandó sebességgel mozog. Jelen esetben ez kb.10 mm-től 75 mm közötti távolság. Tehát a viszkozitásból adódó hibák kiküszöbölésére ez a tartomány használható a mérésekre. Továbbiakban ezen a távolságon belül helyeztem el a viszkoelasztikus tulajdonságot mutató biológiai anyagokat, hogy azok is nagy pontossággal mérhetők legyenek.

A fent bemutatott ábrák alapján kijelenthető, hogy az újonnan fejlesztett automatikus impact műszer:

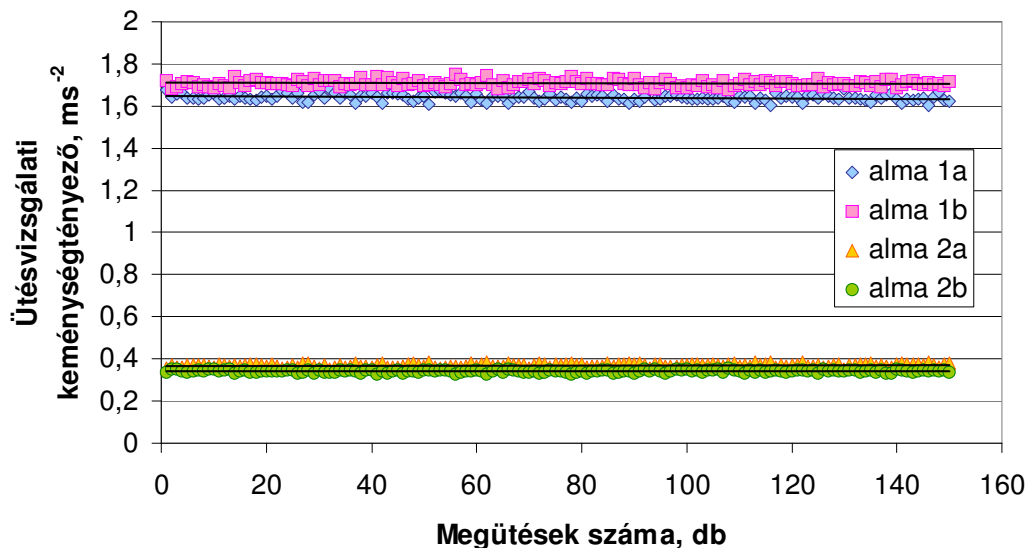
- forgatható mintatartójának köszönhetően alkalmas egy termény pontosan ugyanazon pontjának többszöri vizsgálatára
- nagyon jó reprodukálhatóságot mutat modell anyagra
- viszonylag nagy tartományban (10 mm-75 mm) a kalapács sebessége állandónak tekinthető, ami lehetőséget nyújt a viszkoelasztikus anyagok precíz vizsgálatára.

Tehát ezek alapján elmondható, hogy a Fizika-Automatika Tanszéken fejlesztett automatikus impact műszer alkalmas az egzakt felületi keménység változásának vizsgálatára, így a kis változások is, mint például a mérési paraméterekből adódó változások is vizsgálhatók vele.

### 5.2.2 Metodikai vizsgálatok biológiai anyagokon

Ezek után megállapítottam, hogy egy biológiai anyag esetében milyen biztonsággal tudom vizsgálni a bekövetkező változásokat. Ezért újabb reprodukálhatósági vizsgálatot végeztem, de most már biológiai anyagokon. Gondot fordítottam a mérésnél arra, hogy a minta és a kalapács közötti

távolság a fent említett 10-75 mm-es méréstartományban legyen. A kapott eredményeket 2 alma 2 különböző pontján bemutatva a 26. ábra illusztrálja. Minden mérési pontot 150-szer ütöttem meg.



**26. ábra:** Reprodukálhatósági vizsgálat almamintákon

A kapott pontok átlagát, szórását és százalékos szórását illetve, az adatpontokra illeszthető egyenes egyenletét a 6. táblázat mutatja be.

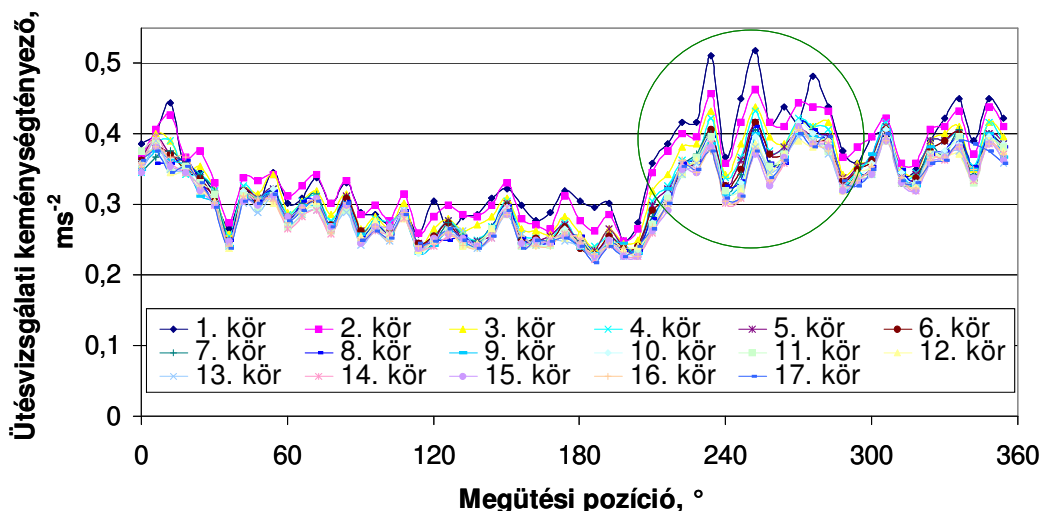
**6. táblázat:** Az almákon végzett reprodukálhatósági vizsgálat eredményei

Adatsor	Átlag	Szórás	Variációs koefficiens (Százalékos szórás)	Egyenlet
alma 1a	1,641	0,01598	0,9737	$y = -8,028E-05x + 1,6477$
alma 1b	1,708	0,01420	0,8314	$y = -1,889E-05x + 1,71$
alma 2a	0,3711	0,005666	1,526	$y = 3,623E-05x + 0,3684$
alma 2b	0,3426	0,005666	1,653	$y = 7,357E-06x + 0,3421$

A táblázatból megfigyelhető, hogy a vizsgálat biológiai anyagon is nagyon jó reprodukálhatóságot érhetünk el a fejlesztett műszer segítségével. A százalékos szórás valamivel növekedett a modell anyagon végzett vizsgálathoz képest. Az első minta esetében 1 % alatti volt, míg a második almamintánál 1,5-1,6 % volt az eltérés, azonban ilyen jó reprodukálhatóság nem igen figyelhető meg a hagyományos keménységmérési módszerek esetében. Hasonló eredményeket kaptam a többi termény esetében is. A fent említett szórásokból arra is következtethetünk, hogy a kb. 2 % alatti változás akár a mérés pontatlanságából is adódhat, azonban az e feletti változásnak már valami más oka van. Az ábra a módszer roncsolásmentességét is demonstrálja.

Nem szabad azonban elfelejtenünk, hogy a zöldségek, gyümölcsök felületi pontjai közötti keménységeltérés nem egy-két %-ban mérhető, hanem akár több 10 %-os is lehet. Ennek

bizonyítására több termény felületi keménységét mértem meg azok egyenlítője mentén. Minden esetben hasonló eredményre jutottam. A 27. ábra körte esetében mutatja be a felületikeményesség-változását. Ehhez a mérésekhez a fém, félgömb kialakítású mérőfejet használtam.



**27. ábra:** Körte felületi keménysége a kerülete mentén

Ez egy nagyon lényeges információ. Megmutatja, hogy a biológia anyagok felületi keménységének a megállapításánál figyelembe kell venni ezt a természetes variabilitást. Látható, hogy ennek a módszernek a jellegzetessége az, hogy lokális tulajdonságot mér, ezért a termény globális keménységének a meghatározásánál ezt a tényt fokozottan figyelembe kell venni.

Nézzünk egy példát, milyen hibalehetőséget rejt ez a variabilitás! Tételezzük fel, hogy az adott termény egyenlítője mentén lévő pontok keménységének százalékos szórása 10 %. Ekkor a mérhető pontok 95 %-os biztonsággal az átlag  $\pm 20$  %-os intervallumban helyezkednek el. Tehát ha egyetlen egy pontot vizsgálunk elképzelhető, hogy az átlaghoz képest 20 %-ot tévedünk. Ez a hiba csökkenthető azzal, hogy ha nem egy hanem legalább 3-4 pontot vizsgálunk terményenként és ezen pontok keménységét átlagoljuk.

A körte felületén lévő pontok keménységkülönbsége mellett egy érdekes dolog figyelhető meg a 27. ábrán, mégpedig az, hogy ugyanazok a pontok egymás utáni mérésével kapott keménységtényező nem ugyanakkora.

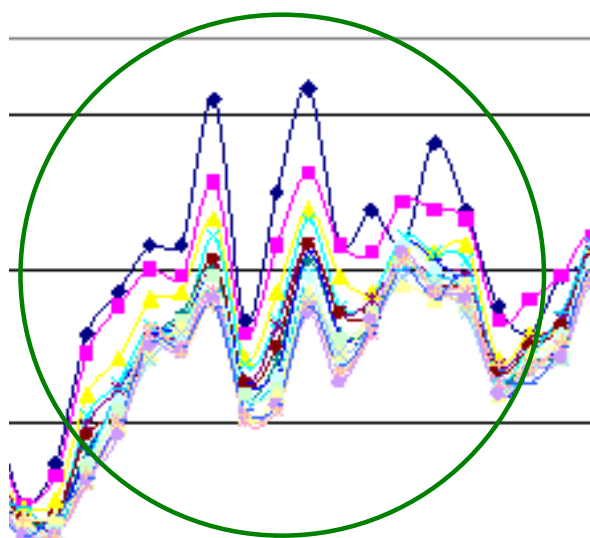
A jobb láthatóság kedvéért kinagyítottam az ábra zöld körrel jelölt részét (28. ábra). Az első néhány megütés hatására úgy látszik, mintha puhulna a minta. Ebből arra lehet következtetni, hogy a megütés során a szövet megváltozik. Látható sérülést azonban nem szenved a termény és több hetes szobahőmérsékletű tárolás során sem látható a mintán a mérésnek semmi nyoma.

Ezek után felmerült bennem a kérdés:

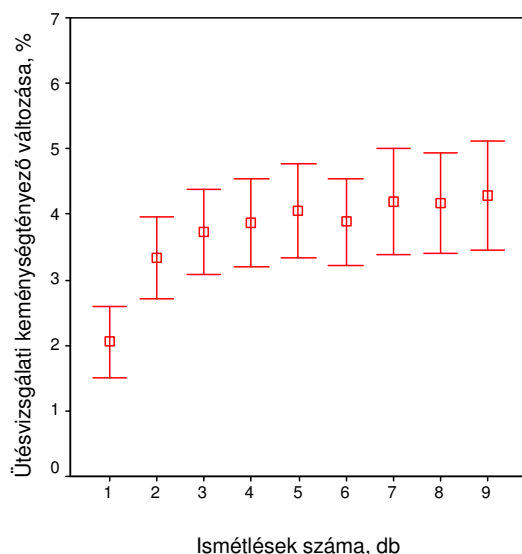
*Függhet-e a mérőfej kialakítástól a többszöri megütés hatására bekövetkező szöveti változás?*

A kérdés megválaszolása érdekében vizsgálatot

folytattam, hogy milyen mértékű ez a változás félgömb vagy sík kialakítású ütőfejekkel. A különböző alakú fejek többszöri megütés okozta kismértékű „puhulás” vizsgálatát ugyanabból a tételből származó egyedeken végeztem el. Minden gyümölcsöt a kerülete mentén 10-szer mértem meg. A mérésekhez nektarinokat és körtéket használtam. Mindkét termény esetében hasonló eredményt kaptam. Az ábra az első mérési pontokhoz viszonyított százalékos változást mutatja. A fém, félgömb fejvel kapott eredmények nektarin esetében a 29. ábrán láthatók.



**28. ábra:** a 27. ábra egy részletének nagyítása

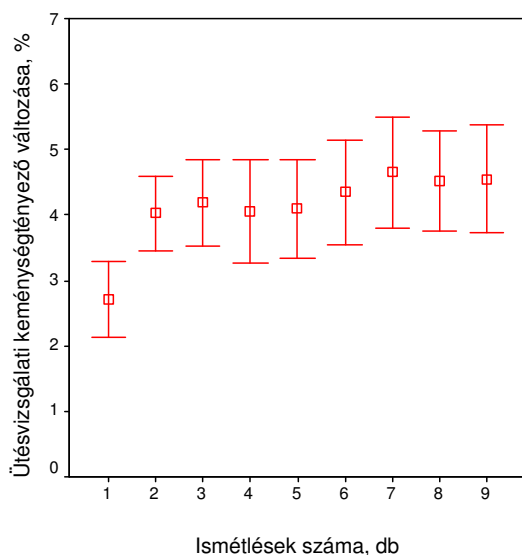


**29. ábra:** Az ütésvizsgálati keménységtényező változása nektarin többszöri megütés során (fém, félgömb kialakítású fejet használva)

Az ábra mutatja, hogy az első ismétlés már kb. 2 %-os változást okozott, ami betudható még a mérés bizonytalanságának is, azonban a 2. illetve a 3. ismétlésre bekövetkező változást már nem

lehet véletlennek tekinteni. A 3., 4. ismételés után szignifikáns változás már nem figyelhető meg a minta felületi keménységében.

A fém, sík kialakítású fejjel történő mérés során ismét megfigyelhetjük az első ismételésre a szövet puhulását (30. ábra).



**30. ábra:** Az ütésvizsgálati keménységtényező változása nektarin többszöri megütés során (fém, sík kialakítású fej használva)

Itt ez a puhulás már valamivel nagyobb, mint 2 %. A 2. ismételésre az eltérés 4 %-ra növekedett, majd a további ismételésekkor bekövetkező változások között itt sem tapasztaltam szignifikáns különbséget. Hasonlóan a félgömb mérőfejhez ezzel a fejjel is a 10 mérési sorozat alatt a minta 4-5 %-os keménységváltozáson ment keresztül. Tehát a változás sík kialakítású fej esetében is a folyamat első részében (2. ismételésre) már végbement.

A két különböző alakú fejjel kapott változást megvizsgálva láthatjuk, hogy az ugyanolyan anyagú (fém), de különböző kialakítású fejekkel való mérés során bekövetkező keménységváltozások között nem találtam szignifikáns különbséget.

A további kísérletek eredményeit bemutató ábrákon a folyamatokat csak a már beállt szakasztól, tehát a 3. ismételéstől mutatom be.

Az előző diagramok mutatják, hogy a fémből készült fejjel történő mérés során bizonyos állományváltozás következik be a terményen. Ennek az állományváltozásnak a csökkentése érdekében felmerül a kérdés:

*Alkalmazható-e egy nem merev, hanem egy rugalmas anyagból készült mérőfej az ütésvizsgálati mérésekhez?*

Ennek jelentősége az érzékeny, sérülékeny termények esetében igen nagy lehetne.

### 5.2.3 Rugalmas mérőfej alkalmazhatóságának vizsgálata

Chen és tsai (1996) az ütésvizsgálati mérésekhez a kemény, ellenálló, sérthetetlen anyagból készült mérőfejet ajánlják. Ennek az oka az, hogy fém fej esetében a kalapács lassulását egyértelműen a termény tulajdonságai határozzák meg, azaz az ütközés során a mérőfej deformációja elhanyagolható a termény deformációjával szemben. Ha azonban nem egy merev anyagú mérőfejjel végezzük a mérést, akkor a kalapács fékeződése –aminek a nagyságából következtethetünk a minta felületi keménységére- nemcsak magától a termény felületétől függ, hanem a mérőfej anyagától is. Tehát a kapott görbe nemcsak a termény, hanem a mérőfej deformációjából adódó fékeződést is magába foglalja. Az ütközés során a mérőfej deformációja nagyságrendileg azonos a minta deformációjával, ezért az ilyen mérőfejjel végzett mérés során a mérőfej jellemzőit is figyelembe kell venni.

Tehát a mérés során bekövetkező keménységváltozás csökkentése érdekében érdemes megvizsgálni annak lehetőségét, hogyan alkalmazható egy puha anyagból készült fej a vizsgálatokhoz.

Első vizsgálatom célja annak a feltételezésnek a megerősítése volt, miszerint a puha fej kevésbé okoz változást a szövetben mérés során, mint a fém fej. A vizsgálatban a fém, félgömb alakú és egy gumiból készült (31. ábra) fejet hasonlítottam össze. A fejek átmérője közel azonos volt.



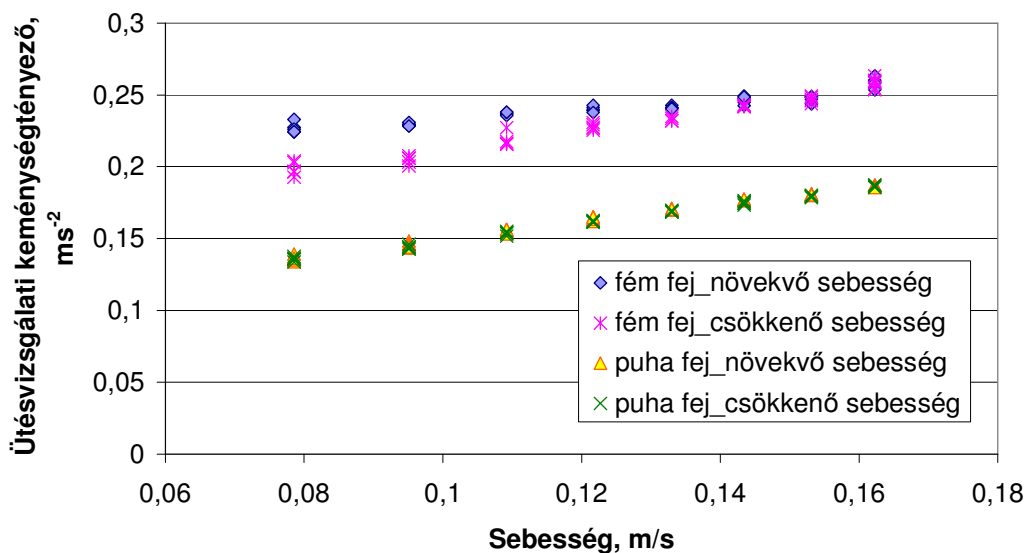
**31. ábra:** Puha anyagból készült mérőfej

Ezen vizsgálat elvégzéséhez, az automatikus impact műszer átalakításra került, oly módon, hogy most már a kalapácsot nem egy állandó erő (rugóerő) taszította el, hanem egy elektromágnes. Ennek taszítóereje változtatható volt, így különböző sebességű megütés volt lehetséges.

A kalapács mozgását az átalakítás után is vizsgáltam. A kar mozgása nem változott, ugyanolyan görbével közelíthető, mint a rugóerővel történő megütésnél (25. ábra). Tehát minden egyes sebességnél volt egy jelentős szakasz, ahol a kalapács állandó sebességgel mozgott. A mintákat a kalács fejétől olyan távolságra helyeztem el, hogy ezzel az

állandó sebességgel kerüljenek megütésre.

A két különböző anyagú fej összehasonlításához a termény ugyanazon pontja került megütésre, először puha, majd fém fejjel. A megütő kalapács sebességét folyamatosan növeltem kb. 0,08 m/s-tól kb. 0,16 m/s-ig 0,02 m/s-onként, majd csökkentettem a kezdeti sebességre. Meg kell jegyezni, hogy a megütő sebesség maximuma megegyezett a rugóerővel történő megütés sebességével. Minden egyes sebességgel a termény ötször került megütésre. A többszöri megütéssel kapott eredmény egyértelműen megmutatja a fej okozta változást a mintán. A kísérlet eredménye alma esetében a 32. ábrán látható.



**32. ábra:** Egy alma ugyanazon pontjának keménysége puha illetve fém fejjel mérve változó sebességű megütés esetén

Az ábrán látható, hogy a fém fejjel való megütés során az alma kismértékű roncsolódást szenvedett, puhult, míg puha fej esetében az odaalakuló és a visszaalakuló görbeszakaszok fedik egymást. Ugyanabban a pontban fejeződött be a mérés, ahonnan kezdődött, így roncsolódásra utaló jel nem látszik. Tehát ez igazolja az elgondolásom, hogy a puha fejjel kíméletesebb mérés végezhető.

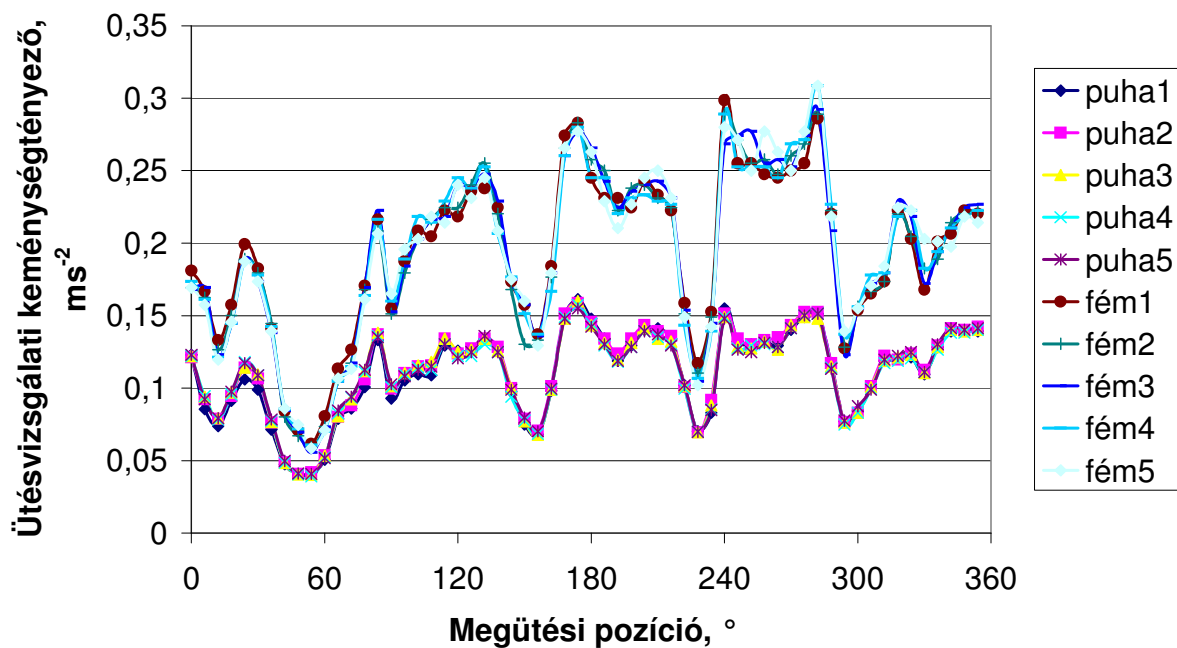
Megfigyelhető az ábrán továbbá az alma viszkoelasztikus tulajdonsága is, ugyanis a megütés sebességének növelésére az ütésvizsgálati keménységtényező is növekedett.

Az is látható a 32. diagramon, hogy ugyanazon pont megütésével más értéket kapunk a két különböző anyagú fejjel mérve.

Az előzőekben láthattuk, hogy a puha anyagból készült fej kíméletesebb vizsgálatot tesz lehetővé, de

*vajon alkalmas-e ugyanazon tulajdonságok jellemzésére, mint a kemény, nagy szilárdságú anyagból készült fej?*

A felmerülő kérdés megválaszolására egy termény felületi keménységét mértem egyenlítője mentén először puha, majd fém fejjel. Ennek a vizsgálatnak az eredménye alma esetében a 33. ábrán látható.



**33. ábra:** Alma minta felületi keménysége az egyenlítője mentén fém illetve puha anyagból készült fejjel mérve

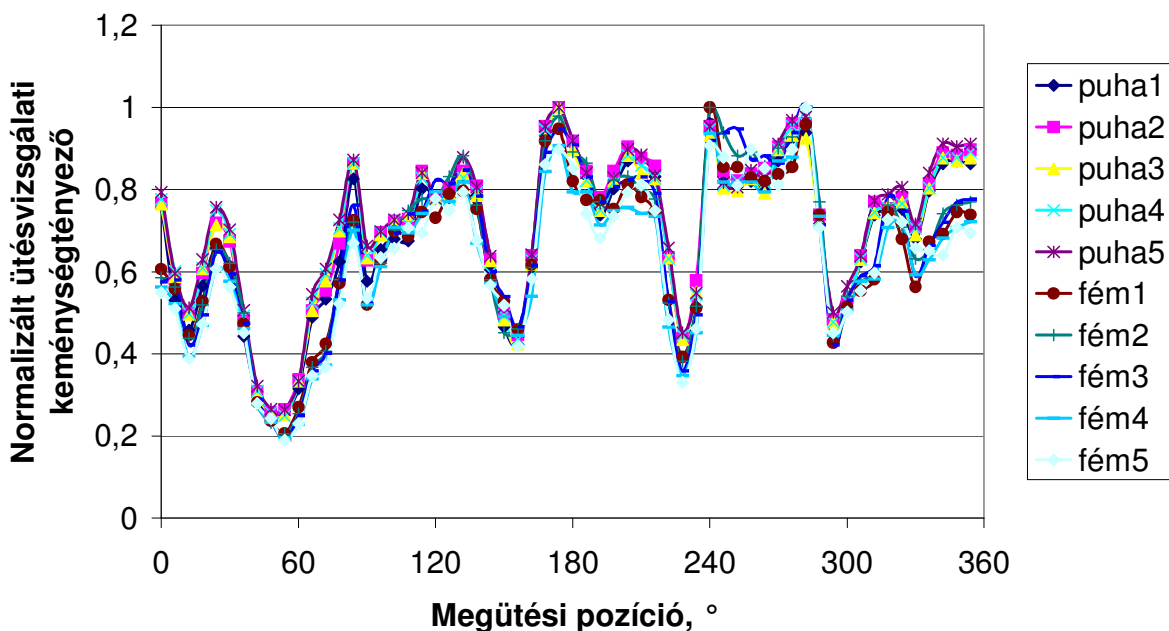
Az ábra jól mutatja, hogy a mind a fém, mind a puha anyagból készült fejjel ugyanolyan tulajdonságok mérhetők. Szinkronban fut mindkét görbe sorozat, tehát a puha anyagból készült fej az almát ugyanott mérte puhának, mint a fémből készült fej.

Különbség is megfigyelhető azonban a két fejjel történő mérés során. A puha fej minden esetben puhábbnak mérte az egyes pontokat, így az adott terméket is puhábbnak minősítené, mint a fém fej. Ez azonban nem meglepő, hiszen itt a mért jelben nemcsak a termény, hanem a puha fej deformációja is benne van.

Érdeemes megfigyelni, hogy mi történik akkor, ha a kapott görbéket normalizáljuk (leosztjuk az egyes adatsorok adatait azok maximumával). Az transzformáció után kapott eredményt a 34. ábra mutatja.

Megfigyelhető az ábrán, hogy a két különböző anyagú fejjel mért keménységtényező egymásba hozható a normalizálással. Tehát a két fejjel mért felületi keménységek az alma kerülete mentén nemcsak hasonlóan változtak, hanem ugyanolyan mértékben is.





**34. ábra:** A fém és puha fejjel kapott ütésvizsgálati keménységtényező normalizálás után

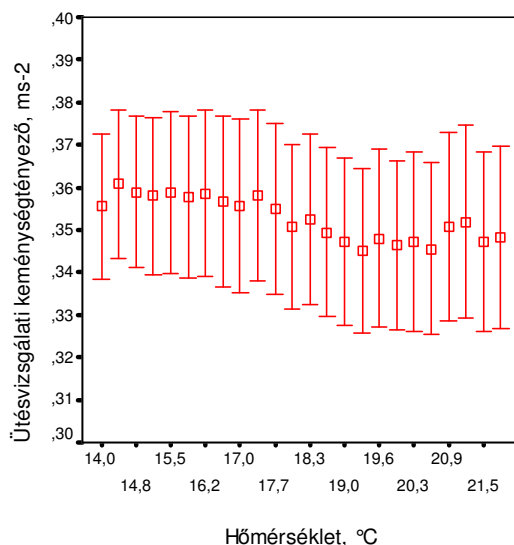
Végeredményben elmondható, hogy

- a puha anyagból készült fej is alkalmas mindazon információ kinyerésére, amit a fém fej használatával kaphatunk.
- Ebből következik, hogy ugyanúgy alkalmas adott tétel minősítésére, illetve alkalmas a tételben szereplő termények keménységének összehasonlítására.
- Előnyt jelent a fém fejhez képest az, hogy a puha fejfel való mérés egy kíméletesebb vizsgálatot tesz lehetővé, így érzékeny, sérülékeny termékek esetében előnyösebben használható.
- A puha fej hátránya viszont az, hogy a kapott jel függ az ütőfej anyagától, hiszen az ütközés során a mérőfej is deformálódik. Így a különböző keménységtényező értéket kapunk ugyanazon terményre fém fejfel és puha fejfel illetve más tulajdonságot mutató puha fejekkel mérve.

#### 5.2.4 A hőmérséklet hatása az ütésvizsgálati keménységtényezőre

A mérési körülmények közül egy lényeges tényező a minta hőmérséklete. Fontos tudni, hogy milyen hatást gyakorol ez a tényező az ütésvizsgálati keménységtényezőre, mert a szerint kell a minta előkészítésnél gondot fordítani rá a pontos mérés érdekében. Ez egy jelentős kérdés lehet például hűtve tárolás alatt történő mérések elvégzésénél is, hiszen érdemes tudni, tévedünk-e a hideg mintán végzett kísérletekkel.

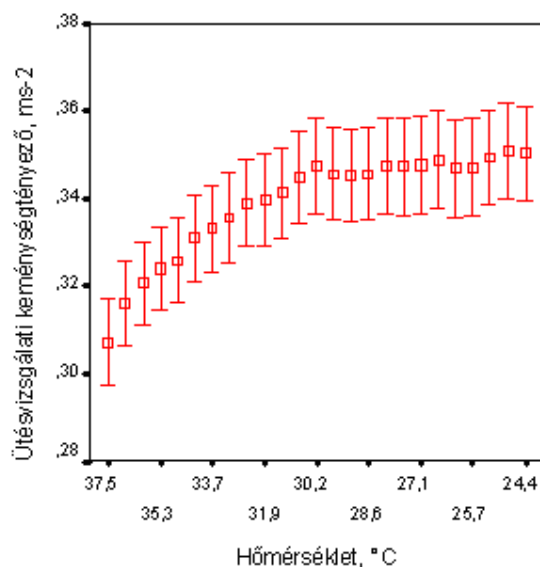
A mintákat hűtőben lehűtöttem, majd onnan kivéve folyamatosan mértem a felületi keménységüket a szobahőmérsékletre való felmelegedés során. A mérés időtartama alatt a minták felületi hőmérsékletét infravörös érzékelőt tartalmazó hőmérsékletmérővel határoztam meg. A kapott eredmény alma esetében a 35. ábrán tekinthető meg.



**35. ábra:** Alma felületi keménységváltozása a hőmérséklet növekedésével

Az ábrán megfigyelhetjük, hogy a minta ütésvizsgálati keménységtényezője alig változott szobahőmérsékletre való melegedés alatt. Egy bizonyos csökkenés (nem szignifikáns változás) azonban megfigyelhető az ábrán a 18 °C-nál magasabb hőmérsékleten, tehát az alma látszólagosan puhult. Mivel ez a mérés több órán keresztül tartott, felmerül a kérdés, hogy kapott puhulás a hőmérséklet változásának, vagy a termés lélegzéséből fakadó, tömegveszteségnek, így a turgorcsökkenésnek tulajdonítható-e.

Ennek kiderítése érdekében ugyanilyen vizsgálatot végeztem csökkenő hőmérsékletű mintákon. A terményeket felmelegítettem 37-38 °C-ra és mértem a felületi keménységváltozását a szobahőmérsékletre való hűlés alatt. A kapott eredményeket alma esetében a 36. ábra illusztrálja.



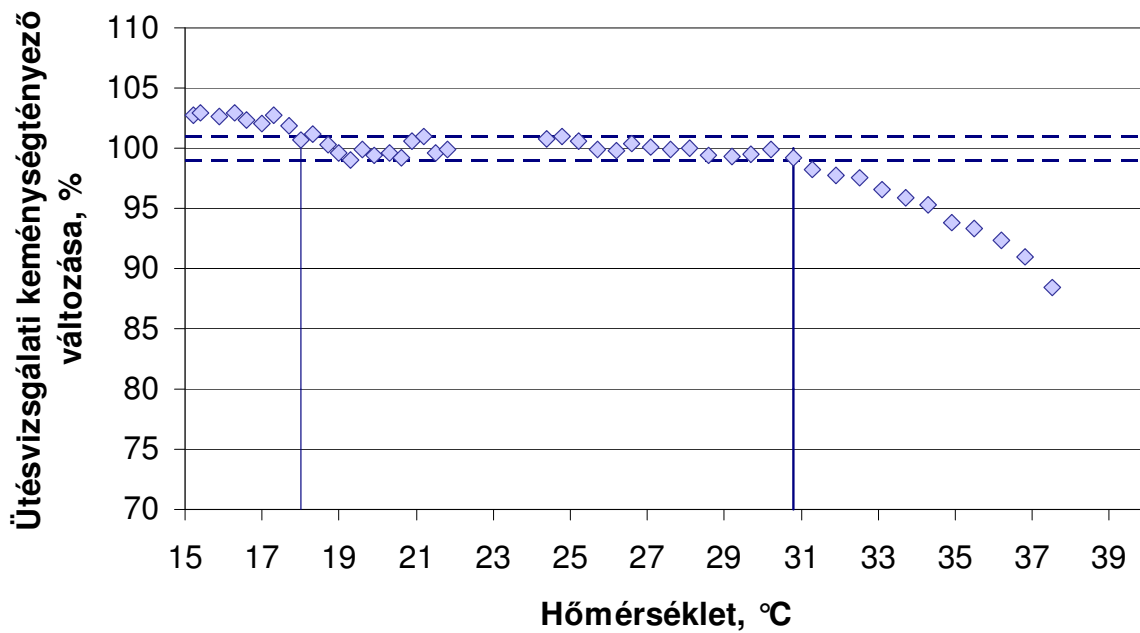
**36. ábra:** Alma felületi keménységének változása a hőmérséklet csökkenésével

Látható az ábrán, hogy az idő elteltével az ütésvizsgálati keménységtényező növekszik, tehát úgy látszik, mintha a minta felülete keményedne a hőmérséklet csökkenésével. A kb. 30 °C elérése után beállt a keménység egy adott értékre, ami már a folyamat további részében szignifikánsan nem változott.

Tehát a hűtőből kivett alma keménysége sem a turgorcsökkenés miatt módosult, hanem a hőmérséklet hatására változott meg (csökkent), ugyanis a hőmérséklet csökkenése ellentétes folyamatot (keménységnövekedést) váltott ki. Ezek alapján elmondható, hogy a hőmérséklet hatással van az ütésvizsgálati keménységtényezőre.

Érdeemes megfigyelni ennek a változásnak a nagyságát. A két hőmérsékletváltozás során bekövetkező változás százalékos értékét a 37. ábra mutatja. Az előbbieken bemutatott két mérési eredmény százalékos változásának ábrázolását úgy végeztem, hogy mindkét esetben a szobahőmérsékleten mérhető értéket tekintetem irányadónak (100 %-nak). Az ettől való eltérés pozitív volt a minta melegedésénél, hiszen keményebbnek mértem ezeket a pontokat a szobahőmérsékleten mérhető értékhez képest, míg ennek analógiára a hőmérséklet csökkenés hatására bekövetkező változás negatív irányú volt (puhábbnak mértem a keménységet magasabb hőmérsékleten).

Az ábrán a szaggatott vonalak az 5.2.2. fejezetben bemutatott, a mérő rendszer bizonytalanságából adódó  $\pm 1$  %-os hibasávot jelölik a 100 %-hoz képest.



**37. ábra:** Alma felületi keménységének százalékos változása a hőmérséklet változásával

Az ábráról látható, hogy bekövetkezik néhány %-os változás 18 °C alatti és 31 °C feletti hőmérsékleten. A  $\pm 1$  %-os határ behúzása után leolvasható, hogy a 18-31 °C tartományban a keménységtényezőt nem befolyásolja mérhetően a hőmérséklet.

Az is megfigyelhető, hogy ha pl. 15 °C-on végezzük a mérést, akkor kb. 3 %-kal keményebbnek mérjük a mintát a szobahőmérsékleten végzett vizsgálatok eredményeihez képest, ami véleményem szerint nem jelentős hiba; nagyobb hiba adódhat a felület variabilitásából. Nem árt azonban, ha tudomásunk van erről az eltérésről, hiszen fontos információ lehet például egy tétel eltarthatóságának előrejelzésében.

Annak a megfigyelésnek, miszerint 31 °C felett a keménységtényező a hőmérséklet növekedésével egyre jobban eltér a szobahőmérsékleten mért értékhez képest, is lehet gyakorlati jelentősége. Mégpedig akkor, ha a termények felületi keménységmérése közvetlenül szüret után történik és a minták hőmérséklete -a magas környezeti hőmérsékletnek köszönhetően- még 31 °C fölött van.

A bemutatott kísérletsorozatban nem foglalkoztam az impactor-tömeg ütésvizsgálati keménységtényezőre gyakorolt hatásának vizsgálatával. A mérések során az impactor tömege állandó nagyságú volt.

### 5.2.5 A kézi impactor alkalmasságának vizsgálata a termények minősítésére

Az előző részben történt vizsgálatok az egyes körülmények (pl.: hőmérséklet, ütőfej anyaga) hatását mutatták be az ütésvizsgálati keménységtényezőre. Ezért ezekhez a mérésekhez olyan automata

rendszert használtam, ahol a megütés sebessége állandó volt. Továbbá láthattuk a 23. ábrán, hogy a megütés sebessége hatással van a kapott ütésvizsgálati keménységtényezőre. Így jogosan merül fel az igény annak megvizsgálására, hogy a kézi megütés során kapott eredmények mennyire helytállóak, azaz

*vajon használható-e a kézi megütés az ütésvizsgálati keménységtényező meghatározására vagy szükséges-e minden helyzetben az automata berendezés alkalmazása?*

A kérdés megválaszolására vizsgáltam azt, hogy mekkora a megütésből származó bizonytalanság egy tapasztalt mérőszemély által végzett kísérletek alatt. Ez a bizonytalanság abból fakad, hogy a termények felületi keménységeit különböző sebességű megütésekből származó alapadatokból számítjuk ki.

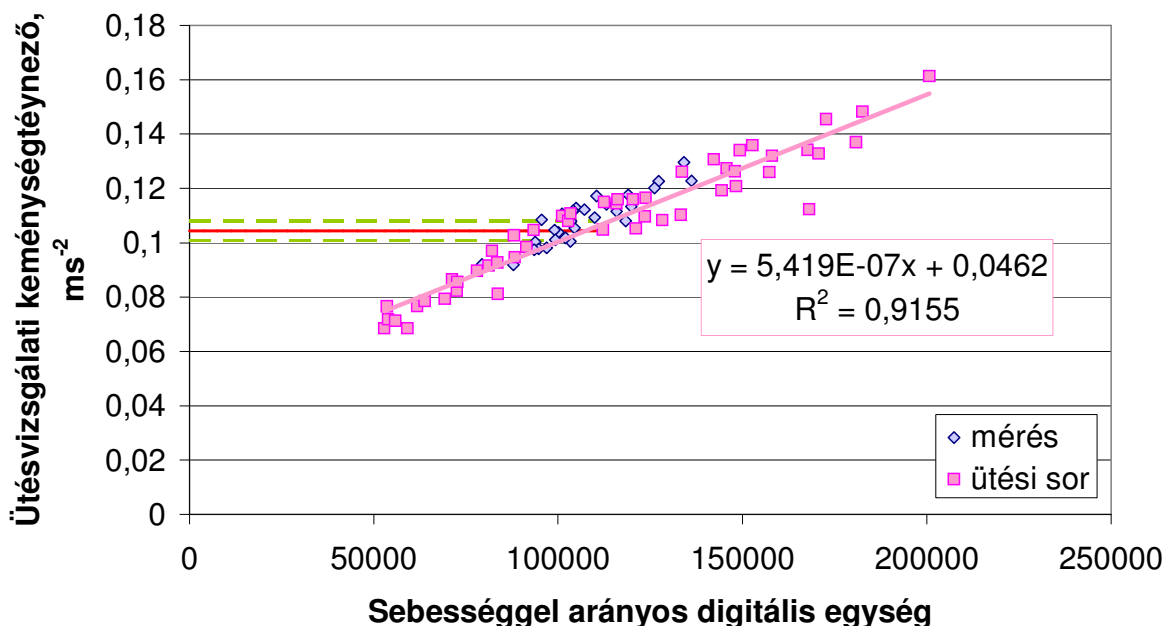
A keletkező bizonytalanság becslésére először vizsgáltam, hogy egy-egy kísérletek során a tételben lévő minták megütése mennyire egyenletesen (azonos sebességgel) történt. A megütő sebességek közötti eltérést az egyes kísérletek (fajták) esetében a 7. táblázatban rögzítettem. A bemutatott értékek csak például szolgálnak a sebességkülönbség megítéléséhez.

**7. táblázat:** A megütési sebesség változása egyes kísérletek esetében

Termény	A megütési sebességgel arányos digitális jel		
	átlaga	szórása	variációs tényezője - %-os szórása
hagyma	11208,37	1400,52	12,49
alma	6690,84	809,58	12,09
paprika	26286,94	3927,96	14,94
ringló	8383,42	1044,80	12,46
burgonya	27525,80	4114,20	14,94
sárgarépa	27400,88	4823,21	17,60
sárgabarack	26255,51	3815,27	14,53
paradicsom	22357,90	3643,98	16,29
mandarin	13181,13	1631,24	12,37
őszibarack	9348,02	997,85	10,67
narancs	12785,68	1934,61	15,13
sárgadinnye	11134,70	1590,07	14,28
körte	7381,16	974,36	13,20
<b>átlag</b>			13,92

A táblázatból látható, hogy az egyes fajták átlag megütési sebessége jelentősen különbözik egymástól, ennek az oka az, hogy maguk az értékek a kísérleti mérőrendszer beállítási paramétereitől függenek. Tehát jelen esetben, a kísérletekben lévő termények keménységének kvalitatív összehasonlítása nehézkes lenne. Viszont az egy fajtan belüli szórás kb. 15 % volt. Nem szabad azonban elfelejtenünk, hogy ez a kb. 15 %-os sebességeltérés nem jelenti feltétlenül a mérés 15 %-os hibáját. Ugyanis az, hogy ez az eltérés mekkora hibát jelent az ütésvizsgálati keménységtényezőben az a termény viszkozitásától függ.

A tényleges hiba becslésének érdekében néhány termény esetében vizsgáltam, hogy az ütési sebesség mennyire van hatással az ütésvizsgálati keménységtényezőre. Egy konkrét minta (alma) estében kapott eredményt mutatja be a következő ábra.



**38. ábra:** Az ütési sebesség hatásának vizsgálata az ütésvizsgálati keménységtényezőre (almamintán)

A minta egy pontját többször megütöttem. A különböző sebességű megütések szándékosan a várható megütési sebességtartománynál szélesebb tartományba estek (rózsaszínű négyzetek). Ezzel képet kaptam arról, hogy a minta esetében milyen változást okozhat a különböző sebességű megütés az ütésvizsgálati tényezőben. Az ütési sebesség és az ütésvizsgálati keménységtényező közötti összefüggés egyenessel volt közelíthető. Ennek az egyenesnek a meredekségéből tudunk következtetni az elkövetett hiba nagyságára.

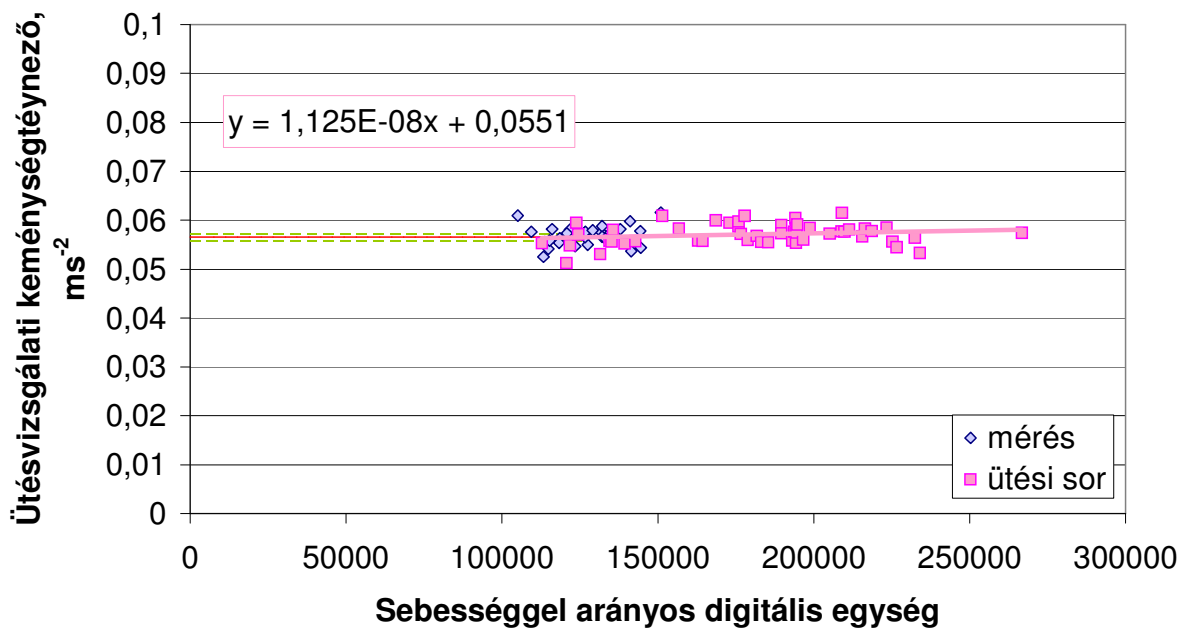
A kék színű négyzetek egy jellemző vizsgálatot mutatnak. A megütési sebességek az előzőhöz képest egy jóval szűkebb tartományban találhatók. Az előző ábrán bemutatott kísérlet során az almaminta megütésekor tapasztalt sebességeltérés 12,5 % volt, ami ilyen paraméterek mellett kb. 6,7 %-os bizonytalanságot okozott az ütésvizsgálati keménységtényezőben. A 38. ábrán lévő piros vonal a jellemző vizsgálat (kék négyzet) adatának átlagát, míg a zöld szaggatott vonal a szórását jelzi.

Néhány termény esetében kapott eredményt a 8. táblázat foglalja össze. Az általam vizsgált terményeknél a sebesség és az ütésvizsgálati keménységtényező között összefüggését minden esetben lineárisnak találtam.

**8. táblázat:** Néhány termény esetében az ütési sorral illeszthető egyenes egyenlete, egy jellemző mérés során kapott sebességeltérés illetve a sebességeltérés miatt keletkező bizonytalanság

Termény	ütési sorra illeszthető egyenes egyenlete	egy jellemző mérés során kapott sebességeltérés, %	az ebből keletkezett bizonytalanság, %	a keletkezett hibák átlaga, %
alma1	$y = 5,419E-07x + 0,0462$	12,53	6,73	5,75
alma2	$y = 5,657E-07x + 0,0442$	10,75	6,16	
alma3	$y = 4,789E-07x + 0,0582$	10,47	4,93	
alma4	$y = 4,828E-07x + 0,0562$	12,03	6,47	
alma5	$y = 2,759E-07x + 0,0571$	10,33	4,47	
paprika1	$y = 7,506E-08x + 0,0546$	8,76	1,27	0,92
paprika2	$y = 5,766E-08x + 0,0488$	8,72	1,48	
paprika3	$y = 5,006E-08x + 0,0503$	11,68	1,21	
paprika4	$y = 2,994E-08x + 0,0612$	8,68	0,44	
paprika5	$y = 1,125E-08x + 0,0551$	9,15	0,20	
hagyma1	$y = 7,239E-07x + 0,0516$	14,27	8,25	6,21
hagyma 2	$y = 6,174E-07x + 0,0717$	15,56	6,49	
hagyma 3	$y = 6,505E-07x + 0,0641$	11,57	6,05	
hagyma 4	$y = 6,547E-07x + 0,0608$	8,41	4,34	
hagyma 5	$y = 5,057E-07x + 0,0769$	10,86	5,96	
paradicsom1	$y = 2,737E-08x + 0,0599$	11,03	0,36	1,03
paradicsom2	$y = 4,093E-08x + 0,0512$	12,60	0,86	
paradicsom3	$y = 2,039E-08x + 0,0474$	17,35	0,60	
paradicsom4	$y = 1,945E-07x + 0,044$	10,24	2,71	
paradicsom5	$y = 5,042E-08x + 0,0555$	9,96	0,61	

Szeretném felhívni a figyelmet a paprika, illetve a paradicsom mérése során kapott eredményekre. Látható, hogy itt a tapasztalt sebességeltérés nagyon kis (1 % körüli) változást okozott az ütésvizsgálati keménységtényezőben, tehát a kapott ütésvizsgálati keménységtényező jóformán független az ütési sebességtől. Ezt mutatja be a következő, 39. ábra paprika esetében.



**39. ábra:** Az ütési sebesség hatásának vizsgálata az ütésvizsgálati keménységtényezőre (paprikaminta esetében)

Látható, hogy a mérési sorra illeszthető egyenes csaknem vízszintes, így az ütési sebesség különbséggel bevitt bizonytalanság minimális.

Eredményeim alapján megállapítható, hogy a mérési körülmények közül

- az impactor sebessége viszkoelasztikus anyagok esetében hatással van a kapott ütésvizsgálati keménységtényezőre. Az általam vizsgált termények közül a paprika és a paradicsom esetében az ütési sebesség okozta ütésvizsgálati keménységtényező-változás elhanyagolható volt. A többi, viszkoelasztikus termény esetében pedig ez a hatás a kézi mérés sebesség variabilitásától függően 6-7 %-nak bizonyult. Fokozott pontosságú méréseknél érdemes ezt a bizonytalanságot egy olyan berendezéssel kiküszöbölni, amiben a kalapács állandó sebességgel mozog.
- az általam vizsgált fémből készült, félgömb és sík kialakítású ütőfejekkel a többszöri megütésre kapott szöveti, azaz keménységbeli változások között szignifikáns különbséget nem találtam. A két különböző alakú fejjel végzett ismételt mérések során a szövetben történt keménységváltozás körte és nektarin estében kb. 4 %-os volt.
- Az ütőfej anyaga befolyásolja a kapott ütésvizsgálati keménységtényezőt. Egy puha anyagból készült ütőfejjel a termény ütésvizsgálati keménységtényezőjét kisebbnek mérjük, mint egy közel azonos átmérőjű fémből készült fejjel. A puha fejjel kapott eredmény azonban hordozza mindazon információt, amit a fém fejjel kaphatunk.



Előnye, hogy csökkenthető vele a többszöri megütésre bekövetkező szöveti változás, így egy „kíméletesebb” mérést biztosít.

- a minta hőmérséklete hatással volt az ütésvizsgálati keménységtényezőre, bár a változás csak néhány %-os volt. Méréseim szerint a 18-31 °C-os tartományban nem volt szignifikánsan kimutatható változás a keménységtényezőben. A 15-18 °C-os tartományban csak néhány (3 %) %-os eltérést mértem pozitív irányban, tehát valamivel keményebbnek mértem a mintát. 31 °C felett az általam mért keménységtényező értéke a hőmérséklet növekedésével egyre jobban eltért negatív irányba a szobahőmérsékleten mért értékhez képest, tehát puhábbnak mértem a mintát.

Nem szabad azonban elfelejtenünk, hogy az itt felsorolt, a mérési körülményekből származó bizonytalanságok jóval kisebbek a termények felületi keménységbeli különbségéhez képest. Ugyanis, ahogy azt láthattuk, mind a 27. mind a 33. ábrán a termény egyes pontjainak felületi keménysége között több 10 %-os eltérés is lehet. Ezért nagyon fontos, - ha az ütésvizsgálati módszerrel a termény globális keménységéről szeretnénk információt kapni - hogy több pont keménységét mérjük, és azok átlagából számítsuk ki a minta keménységét.

### 5.3 Sárgarépa állományváltozásának vizsgálata akusztikus és ütésvizsgálati módszerrel

Ebben a kísérletben azt vizsgáltam, hogy az akusztikus és ütésvizsgálati módszerrel követhető-e a hőkezelés okozta állományváltozás. A puhulási folyamatok leírásához a dinamikus módszerek mellett referencia módszereként a hagyományos keménységmérési módszert (SMS precíziós penetrométert) és egy precíziós impedancia mérőműszert (HP 4284A RLC) használtam. A kísérlet lehetőséget nyújt arra is, hogy a kapott eredmények segítségével vizsgálhassam, hogyan jellemzi ugyanazon termény állományát a két dinamikus (akusztikus, ütésvizsgálati) illetve a hagyományosan használt keménységmérési módszer. Így következtetéseket vonhatok le arra vonatkozólag, hogy a három módszerrel mért keménységértékek a termény mely részét jellemzik, milyen jellegűek illetve milyen összefüggés van közöttük.

A méréseim során a sárgarépa állományváltozását vizsgáltam. Az állományváltozást mikrohullámú hőkezeléssel értem el, amelynek a célja a gyors puhulás előidézése volt. A sárgarépa tárolás alatti puhulása, keménységcsökkenése nagyrészt a bekövetkező turgor-, azaz vízveszteségnek köszönhető. A tárolással szemben azért találtam előnyösebbnek a mikrohullámú kezelést, mert ekkor a belső szerkezet néhány másodperces kezelésnek köszönhetően nagymértékű átalakuláson megy keresztül.

A minták keménysége mellett, annak dielektromos jellemzőit is vizsgáltam, hiszen ennek segítségével információt kaphatok a sejtekben, illetve a sejtközi térben történő változásokról. A hőkezeléseket az egész sárgarépán végeztem el és ugyanazon minta állományváltozását mértem mind a négy módszerrel.

A minta mikrohullámú hőkezelésének teljesítményére illetve idejére vonatkozó leírás az Anyagok és módszerek fejezetben található.

A két dinamikus módszerrel a minták egészben kerültek vizsgálatra. Az akusztikus módszerrel a minták az Anyagok és módszerek fejezetben leírtak szerint kerültek mérésre, az ütésvizsgálati módszerrel, pedig három pont keménysége (a minta két végén és a közepén) került vizsgálatra. A három ponton mért keménység átlagával jellemeztem a répa felületi keménységét.

A hagyományos keménységmérővel (SMS precíziós penetrométerrel) történt méréshez a minta középső részéből vágtam ki 1 cm vastag korongokat. A méréseket a vágókés-fejjel végeztem; mértem a korong átvágásához szükséges maximális erőt. Az átvágás minden esetben a korong átmérője mentén történt.

A dielektromos mérések során a minták impedanciájának nagyságát és fázisszögét mértem RLC műszerrel. 10000 Hz-en mért adatokat használtam fel az eredmények kiszámításához. Az egész

répaminták dielektromos tulajdonságát a kezelés előtt és a kezelés után is megmértem. A kezelt minták 1 cm-es korongjainak az impedanciáját újra megmértem, most a háncs illetve a fa részen, ezzel átfogó képek kaphatók a minta állományváltozásáról.

Mind a négy módszernél, a kezelés hatására bekövetkező elég nagy (30-40 °C) hőmérsékletkülönbségekből adódó hibák elkerülése érdekében az egyes kezeléseket után a mintákat hagytam szobahőmérsékletre lehűlni, és csak azután kezdtem el a vizsgálatokat. A minta variabilitásából adódó hibák kiküszöbölése érdekében a relatív változást vettem figyelembe.

A mérésekhez közel azonos hosszúságú mintákat választottam, azonban ezeknek a tömege -a közel azonos hossz ellenére- eltérő volt. Az azonos kezelési csoportban lévő minták függetlenül az azonos hőkezelési időtől és teljesítménytől különböző mértékű hőkezelésnek lettek kitéve – köszönhetően a mintatömegek közötti különbségnek. A kapott hőkezelés mértékét, feltehetőleg nemcsak a terményre ható mikrohullámú hőkezelés ideje és sugárzott teljesítménye határozta meg, hanem a tényleges energia elnyelés a mikrohullámú térben lévő minta tömegétől is függ. Ezért a hőkezelés mértékének jellemzésére, az egységnyi tömegre jutó energia érték, mint mérőszám került bevezetésre:

$D=t \cdot P/m$ , ahol a

D: a hőkezelés fajlagos energiaértéke, dózis, Ws/g  
t: a kezelési idő, s  
P: a mikrohullámú kezelés teljesítménye, W  
m: a minta tömege, g

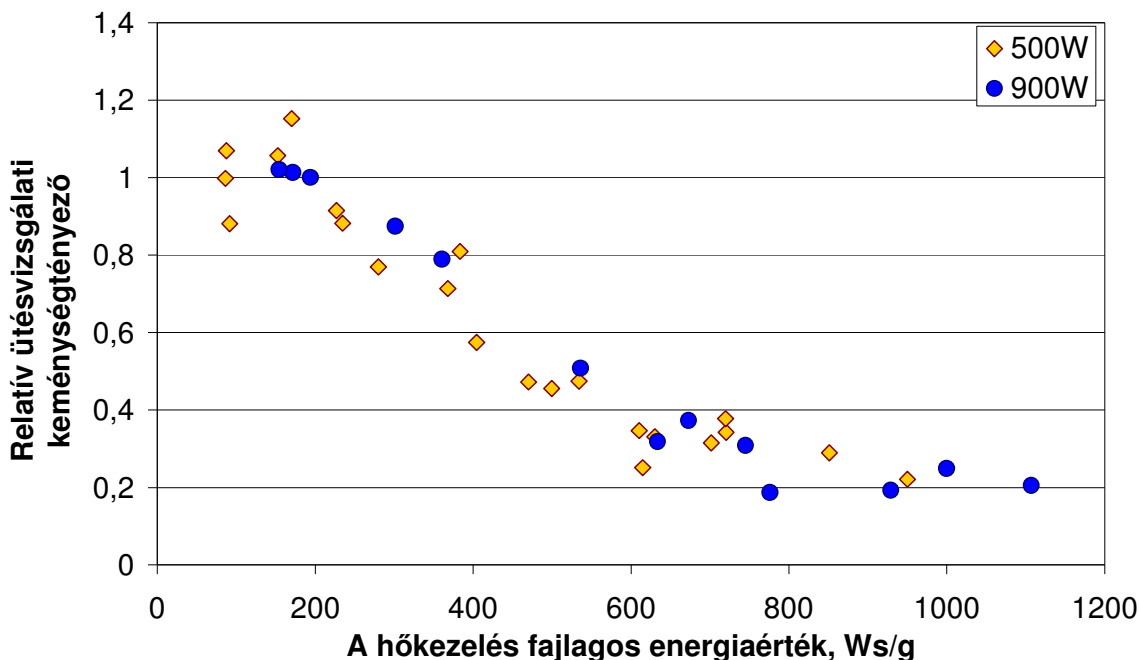
Ezen összefüggés helyességét igazolja a 40-41. ábra, mert az 500W és a 900W-on hőkezelt minták nem válnak szét két csoportba. Ezért ezt az összefüggést használtam minden minta esetében a hőkezelés mértékének jellemzésére.

Az egészben vizsgált répa változásait a nyers minta állományához képest tüntettem fel, kiküszöbölve a répák közötti különbségből adódó hibákat. A relatív jellemzőt úgy számítottam ki, hogy a minta, kezelés utáni keménységét/impedanciáját elosztattam a kezelés előtti (nyers) állapot keménységével/impedanciájával. A roncsolást igénylő méréseknél, tehát a hagyományos keménységvizsgálatnál és a répakorongok dielektromos jellemzőinek vizsgálatánál nem a relatív változások, hanem a mért értékek lettek feltüntetve.

### 5.3.1 Az egész sárgarépaminták keménységének változása

A 40. ábra a hőkezelés során bekövetkező változást mutatja ütésvizsgálati módszerrel mérve. Az ábrán azt látjuk, hogy a minta felületi keménysége monoton puhulást mutat az egyre nagyobb dózisú kezelésre. A kb. 800 Ws/g hőkezelésig egy nagymértékű puhulás figyelhető meg. A 800

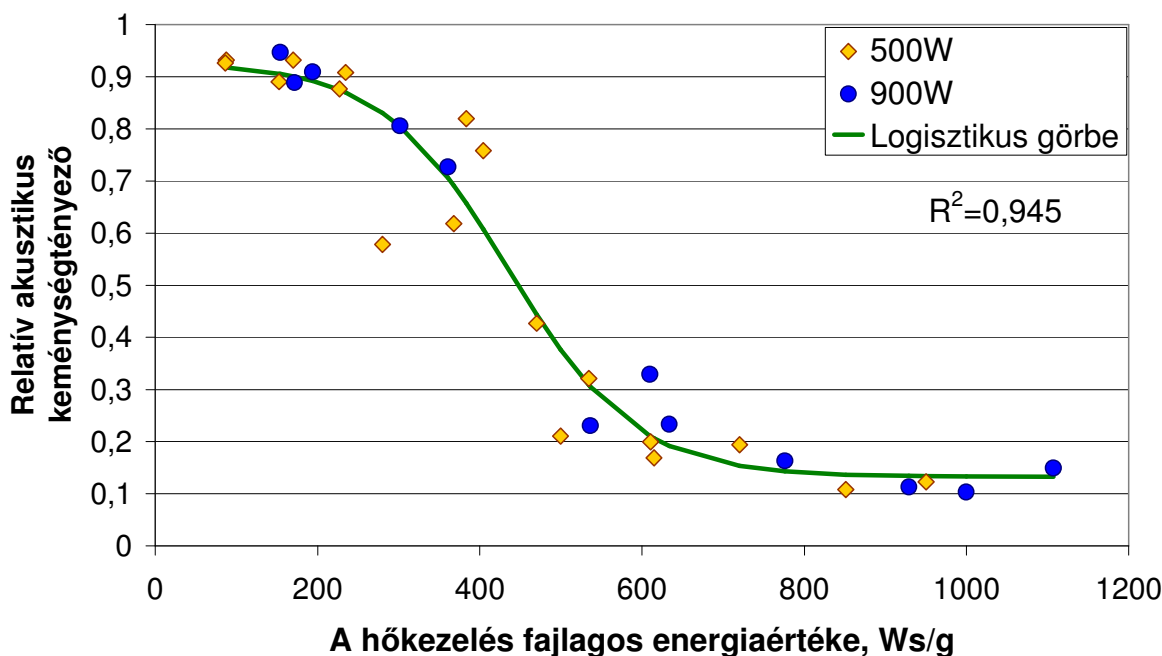
Ws/g-os kezelés felett, mikor a minta keménysége kb. a 20-25 %-ára puhult le, a sárgarépa keménysége már nem változik jelentősen.



**40. ábra:** A mikrohullámú hőkezelés hatására bekövetkező ütészvizsgálati keménységtényező-változás

A répaminták akusztikus módszerrel mérhető globális keménységváltozása az ütészvizsgálati keménységméréssel kapott folyamattól eltérő volt (41. ábra). Egy logisztikus görbe illeszthető a kapott adatokra. Az ábra azt mutatja, hogy a mikrohullámú kezelés csak egy kismértékű puhulást eredményez a folyamat kezdetén, majd egy ugrásszerű változás, egy gyors puhulás történik. A folyamat végén az ütészvizsgálati módszerrel kapott görbéhez hasonlóan a keménység már csak kismértékben változott.

A 9. táblázat tartalmazza a mérési pontokra illesztett logisztikus görbe paramétereit a 41., 47-50. ábrára vonatkozólag. A görbe inflexiós pontjának meghatározásával megállapítható az a dózis, ahol az ugrásszerű változás következett be. Ez jelen esetben 435 Ws/g volt.



41. ábra: A mikrohullámú hőkezelés hatására bekövetkező akusztikus keménységtényező-változás

9. táblázat: A logisztikus görbe paraméterei

A logisztikus görbe egyenlete:

$$S(t, r, F_{-\infty}, F_0, F_{+\infty}) = F_{+\infty} + \frac{(F_{-\infty} - F_{+\infty}) \cdot (F_0 - F_{+\infty})}{F_0 - F_{+\infty} + (F_{-\infty} - F_0) \cdot e^{r \cdot t}}$$

Adatok	$r$	$F_{-\infty}$	$F_0$	$F_{+\infty}$	Inflexió pont
41. ábra: Relatív akusztikus kem. tény.	0,013	0,927	0,924	0,133	435
47. ábra: Elektromos impedancia	0,014	1061,174	1060,830	458,791	542
48. ábra: Fázisszög	0,014	-54,725	-54,703	-8,348	541
49. ábra: Elektromos impedancia	0,015	2157,554	2157,403	512,506	604
50. ábra: Fázisszög	0,016	-52,936	-52,935	-8,140	630

Ahol az  $r$  - növekedési ráta

$F_{-\infty}$  - a görbe elméleti értéke a mínusz végtelenben

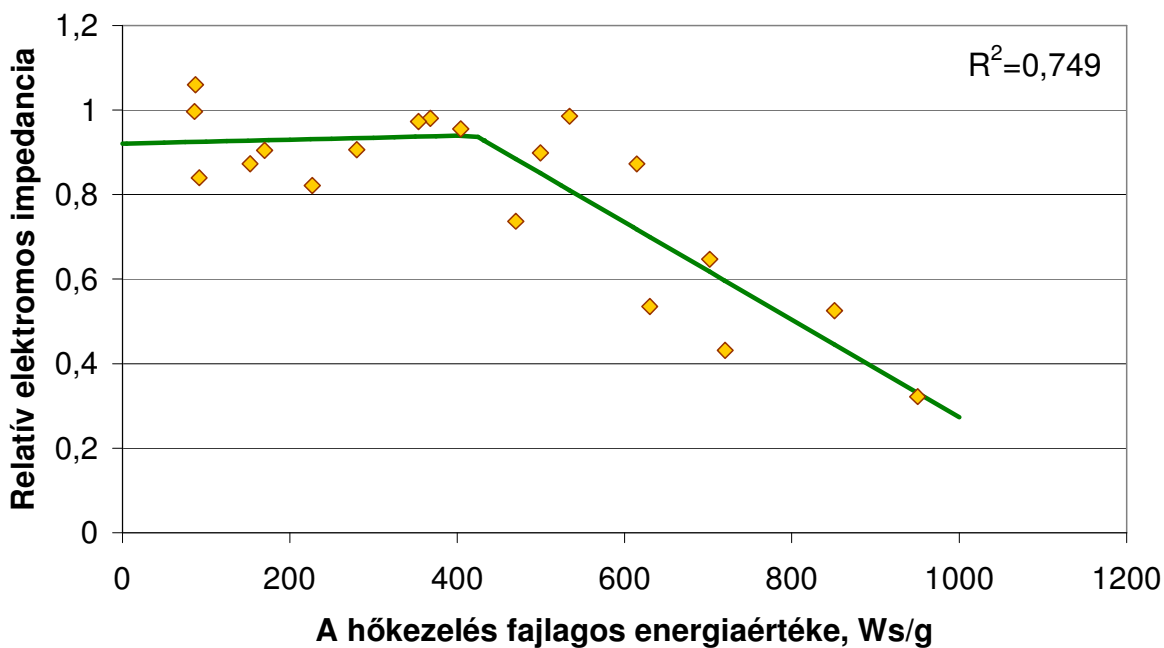
$F_0$  - a 0 Ws/g dózisinál a görbe értéke

$F_{+\infty}$  - a görbe elméleti értéke a plusz végtelenben

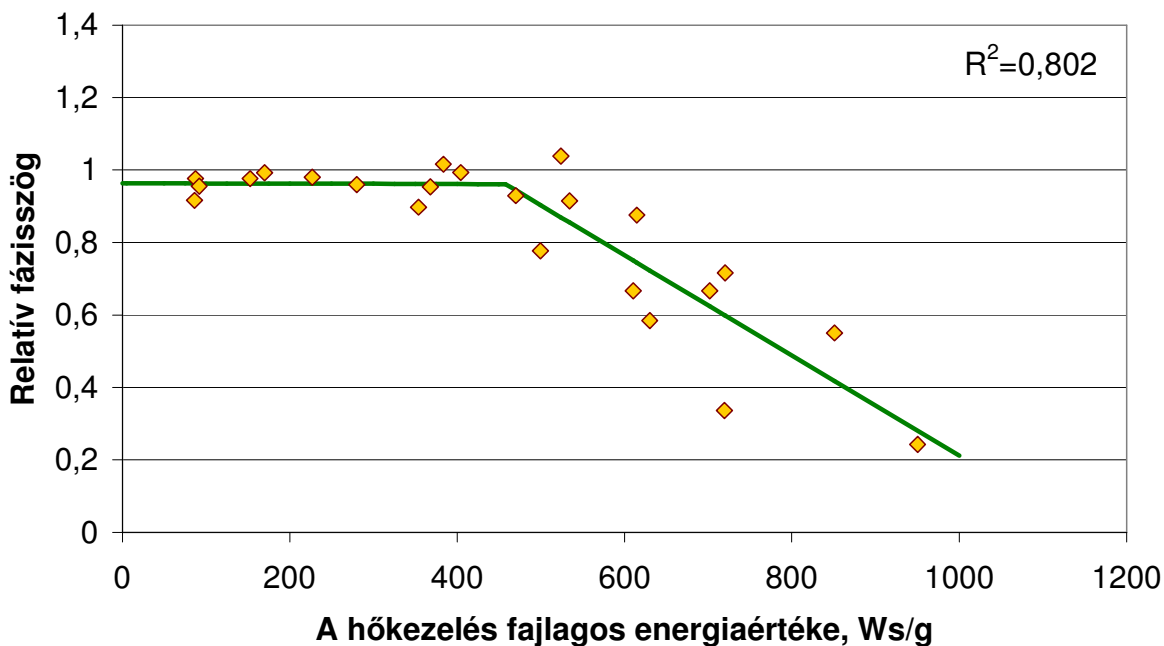
### 5.3.2 A sárgarépminták belsejében történő változások vizsgálata

A sárgarépa belsejében történő változások vizsgálatára a dielektromos módszert használtam. Az egész répminták dielektromos tulajdonságai is ugrásszerűen változtak a hőkezelés hatására, hasonlóan az akusztikus módszerrel mért eredményekhez. A 42. és a 43. ábra mutatja be az egészben mért répminták impedancia és fázisszög változását. Ezeken a diagramokon is a relatív

változásokat tüntettem fel. Az adatpontokra illesztett görbék tulajdonságait a 10. táblázat tartalmazza.



**42. ábra:** Az 10000 Hz-en mért elektromos impedancia változása az egész répamintában a hőkezelés során (500W)

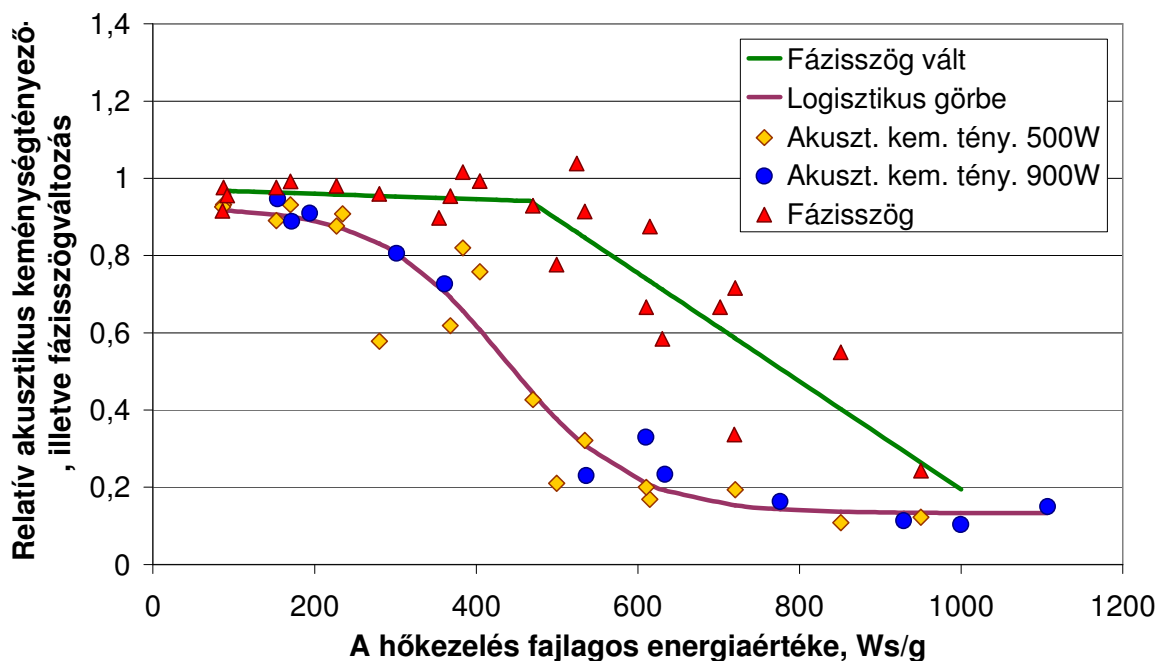


**43. ábra:** Az 10000 Hz-en mért fázisszög változása az egész répamintában a hőkezelés során (500W)

**10. táblázat:** Az illesztett egyenesek paraméterei

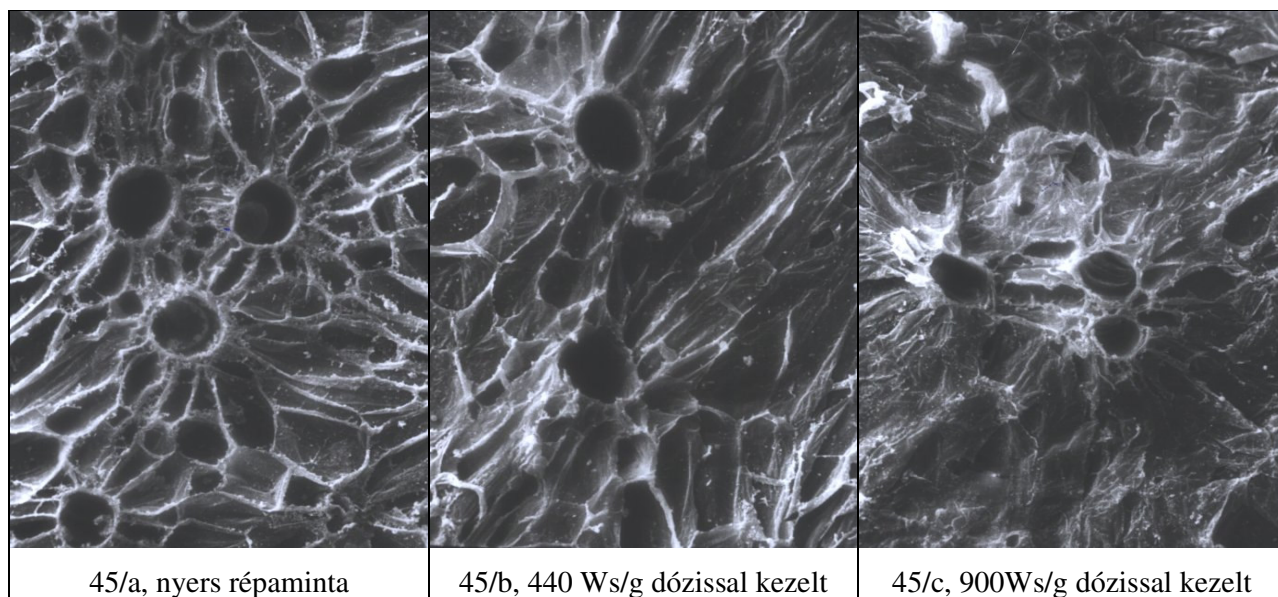
Adatok	Egyenlet	Metszési pont
42. ábra: Relatív elektromos impedancia	$y = 4,574E-05x + 0,9207$	422
	$y = -1,152E-03x + 1,4258$	
43. ábra: Relatív fázisszög	$y = -4,646E-06x + 0,9632$	458
	$y = -1,383E-03x + 1,5943$	

Az előbb említett ábrákon látható, hogy a mind az impedancia, mind a fázisszög ugrásszerű változása a kb. 420-460 Ws/g tartományban történt, hasonlóan az akusztikus keménységtényező változásához. A hasonlóság jól látható, ha a két görbét egy diagramban ábrázoljuk (44.ábra). Ez a jelenség arra utal, hogy ekkor a mikrohullámú hőkezelés hatására szerkezetváltozás következett be. Valószínűleg ezt a változást az okozza, hogy a sejtfalak roncsolódtak a hőkezelés hatására és a sejt plazma a sejtől a sejt közötti térbe áramlott.



**44. ábra:** A relatív akusztikus keménységtényező és a relatív fázisszög változása a hőkezelés során

Ezt a megfigyelést igazolják az elektronmikroszkópos felvételek (45. ábra). A felvételekhez a minták a répa közepének háncsrészből származtak. A fotók 200-szoros nagyítással készültek. A képeken a mikrohullámú hőkezelés okozta sejtroncsolódás jól megfigyelhető. A 45/a kép egy nyers répáról, a 45/b egy 440 Ws/g, míg a 45/c fotó egy 900 Ws/g-os hőkezelésnek alávetett minta sejtstruktúrájáról készült. A 45/b ábrán látható minta olyan dózisú kezelést kapott, ami abba tartományba esik, ahol -mind az akusztikus, mind a dielektromos méréseknél tapasztalt- ugrásszerű változást történt, míg a 45/c ábra egy nagy dózissal hőkezelt mintáról készített fénykép.



**45. ábra:** A répa sejtszerkezetének változása mikrohullámú hőkezelés során

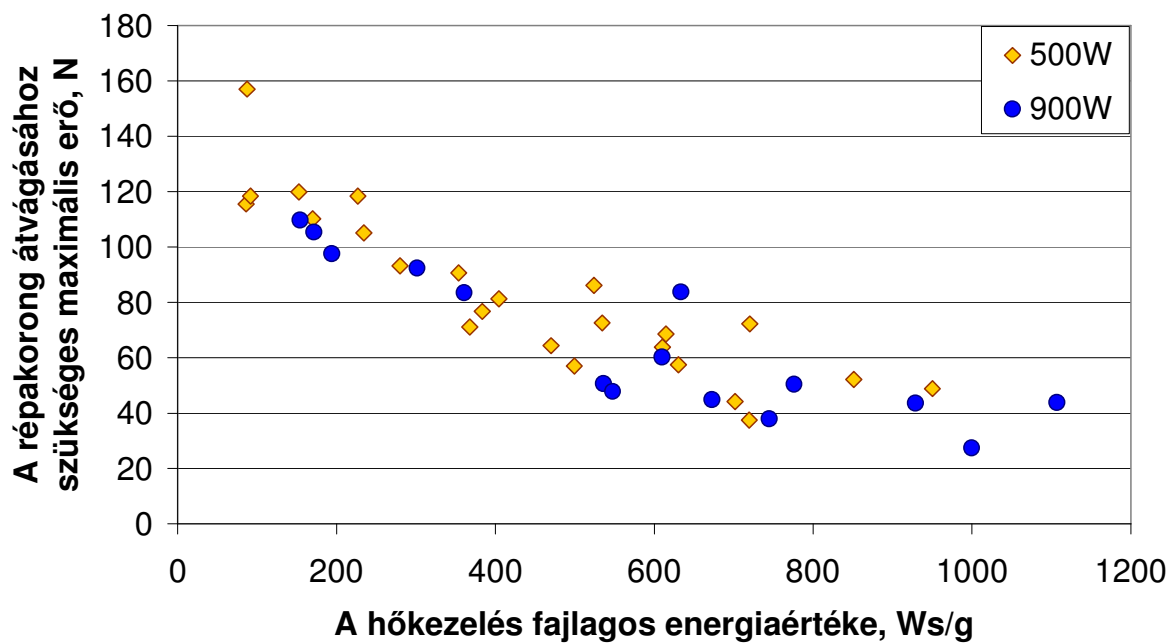
A képekről megfigyelhető, hogy a nyers répánál az edénynyalábok metszete még viszonylag szabályos kör alakúak. A nyers mintában lévő sejtfalak még épek és az egyes sejtek egymástól jól elhatárolhatók, de ez egyre nehezebben tehető meg a hőkezelés előrehaladtával. A 45/b ábrán már látható, hogy elkezdődött a változás. A sejtek, sejtfalak egy része már roncsolódott, azonban még vannak sejtek, amelyek még elkülöníthetők egymástól. Ekkor még az edénynyalábok is csak kismértékben torzultak. Valószínű, hogy ekkor már a sejtplazma kijut a sejtközi térbe, ezért következik be a dielektromos jellemzőkben egy ugrásszerű változás. A 45/c ábrán a sejtek falai már egyáltalán nem vehetők ki, nem különböztethetők meg a sejtek egymástól és az edénynyalábok is deformáltak.

Tehát ebből is látszik, hogy a hőkezelés előrehaladtával a roncsolódott sejtek és a deformálódott sejtkomponensek száma egyre nőtt.

### 5.3.3 Sárgarépakorongok jellemzőinek változása

A répa korongok keménységét a precíziós peneterométerrel mérem meg. A répakorongok hagyományos keménységméréssel kapott puhulása (46. ábra) nagyon hasonló volt a 40. ábrán bemutatott egész répaminták ütésvizsgálati módszerrel kapott puhulásához.



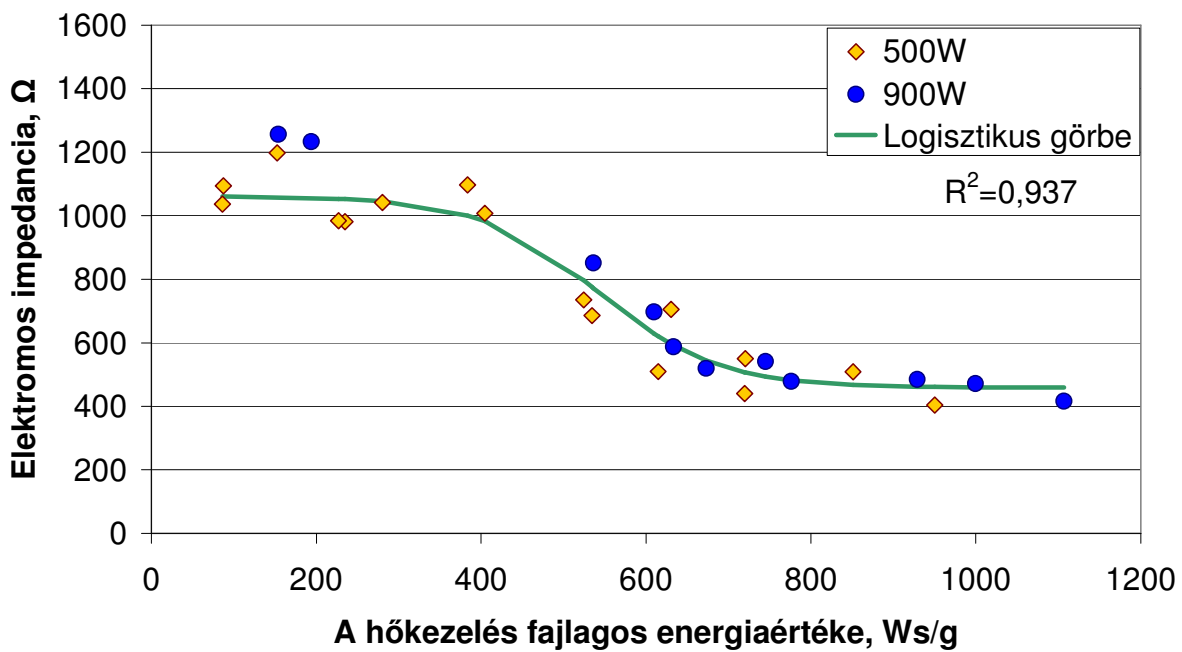


**46. ábra:** A répakorongok átvágásához szükséges maximális erő változása a hőkezelés során

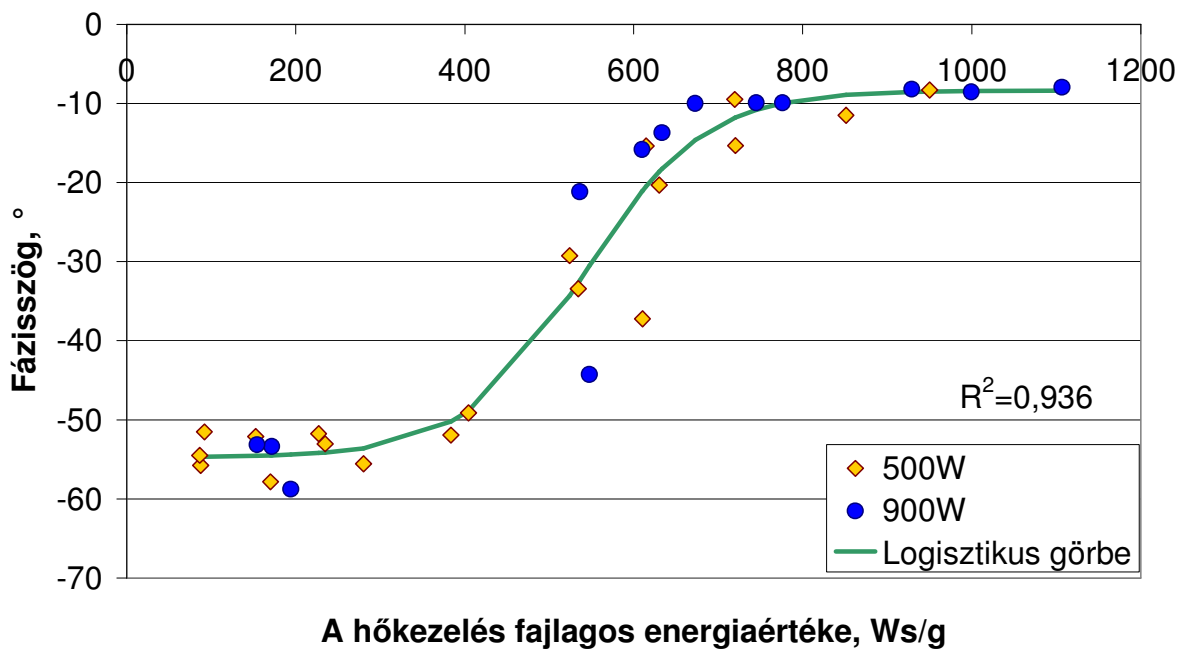
Itt is megfigyelhető a répakorongok keménységének monoton csökkenése, azaz a hőkezelés hatására bekövetkező puhulás.

A hőkezelt sárgarépakorongok dielektromos tulajdonságait leíró görbék (47-50. ábra), hasonló lefutást mutattak, mint az egész répaminta akusztikus vizsgálattal kapott, a hőkezelés hatására bekövetkező változást leíró görbe (41. ábra). A 47. és 49. ábrán a szeletek fa- illetve háncsrészének impedancia-változása látható, míg a 48. és az 50. ábrán a fa- illetve háncsrész hőkezelés hatására bekövetkező fázisszög-változását figyelhetjük meg. Az adatokra illeszthető görbék paramétereit az akusztikus vizsgálatnál ismertett 9. táblázat mutatja.

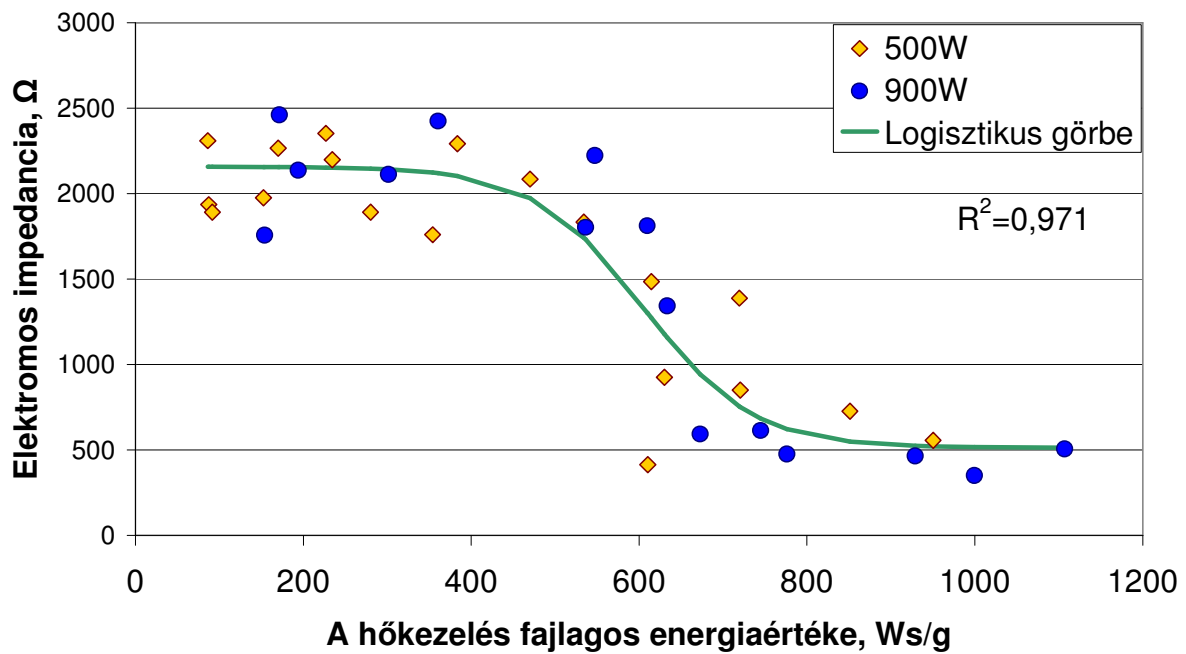
Az ábrákról leolvasható, hogy a korongok dielektromos tulajdonságában szignifikáns változás történt az 540 Ws/g-os hőkezelési szint hatására a háncs részen, míg 600-630 Ws/g-os hőkezelési szint hatására a fa részen.



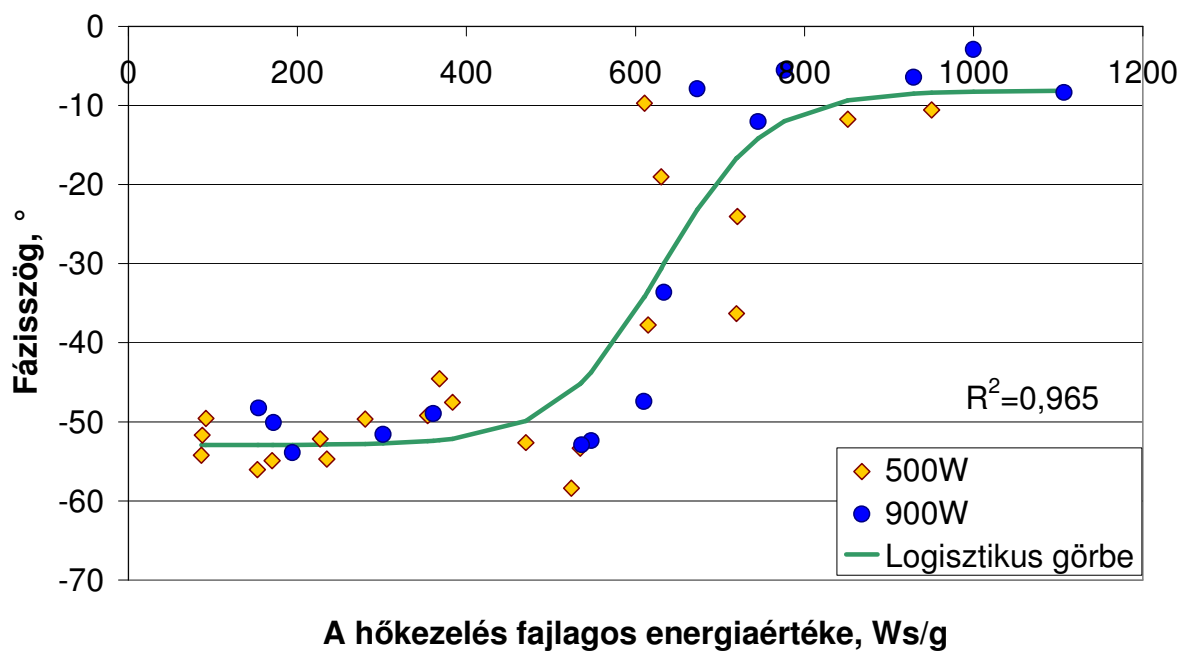
47. ábra: Az 10000 Hz-en mért elektromos impedancia változása a répakorongokban a hőkezelés során (farész)



48. ábra: Az 10000 Hz-en mért fázisszög változása a répakorongokban a hőkezelés során (farész)



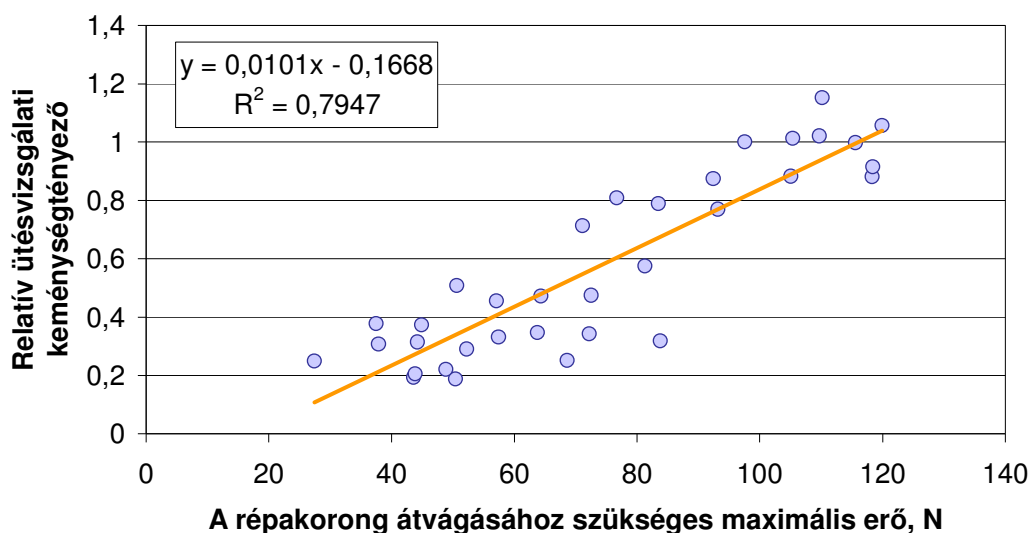
**49. ábra:** Az 10000 Hz-en mért elektromos impedancia változása a répakorongokban a hőkezelés során (háncsrész)



**50. ábra:** Az 10000 Hz-en mért fázisszög változása a répakorongokban a hőkezelés során (háncsrész)

### 5.3.4 Az ütésvizsgálati, az akusztikus módszerrel és a hagyományos keménységméréssel kapott állományjellemzők összehasonlítása

Érdekes a módszerek összehasonlítása előtt végiggondolni, hogy mely módszerrel a minta mely jellemzője mérhető, illetve mely jellemzője került mérésre a vizsgálat során. Az ütésvizsgálati módszerrel a termény felületi keménységének változása mérhető; az akusztikus módszerrel a minta globális keménysége. A hagyományos keménységtényező mérésénél a jelen kísérletben a répakorongok átvágásához szükséges maximális erőt vettem alapul, ami a hánacs- illetve a farész keménységétől függő jellemző. Ha elfogadjuk a három módszerrel kapott eredményeket, akkor arra következtethetünk, hogy a mikrohullámú kezelés más változást okoz a minta belsejében, mint a minta felületén. A 40. és a 46. ábrákat összehasonlítva is kijelenthető, hogy az ütésvizsgálati és a hagyományos penetrációs módszerrel mért jellemző nagyon hasonló egymáshoz. Ez azonban nem meglepő, hiszen a penetrométerrel történő mérésnél a maximális erőt a keményebb rész keménysége határozza meg, ami jelen esetben a külső, hánacs-rész volt. Tehát elmondható, hogy az ütésvizsgálati és a hagyományos keménységmérési módszerrel közel ugyanaz a jellemző került mérésre a kísérlet alatt. Ezt mutatja a közöttük lévő összefüggés is (51. ábra). A korrelációs koefficiens értéke: 0,8915.



**51 ábra:** Az ütésvizsgálati és a hagyományos keménységméréssel kapott keménységek közötti összefüggés

Az akusztikus módszerrel teljesen más jellegű keménységet mérhetünk, mint az előző kettővel, hiszen a kapott keménységtényezőt nemcsak a hánacs-rész keménysége határozza meg, hanem az egész répaminta változása. Ezért nincs értelme a kapott eredményeket a másik két módszerrel összehasonlítani. Az, hogy a termény más jellemzőjéről kaphatunk információt az akusztikus

méréssel, véleményem szerint csak előnyt jelent, hiszen a két roncsolásmentes módszert együtt alkalmazva egy átfogó képet kaphatunk a terményben bekövetkező változásokról.

A kísérletek eredményeinek összegezése után elmondható, hogy az ütésvizsgálati és az akusztikus módszer alkalmas nemcsak a tárolás, hanem a hőkezelés okozta fizikai változások követésére is. Az eredmények azt mutatják, hogy a két dinamikus módszerrel mért keménységek más mechanikai tulajdonságot jellemeznek. A kísérletben az ütésvizsgálati módszerrel és a hagyományos keménységméréssel kapott eredmények között szoros összefüggést találtam. Az akusztikus módszerrel mért jellemző, ami a minta globális keménységét jellemzi, és az ütésvizsgálati módszerrel kapott jellemző, ami a minta felületi keménységét jellemzi különböző változáson ment keresztül a hőkezelési folyamat során. Ebből arra következtethetünk, hogy a mikrohullámú hőkezelés más változást okoz a minta belsejében, mint a minta felületén. Mind a felületen, mind a belsejében történő változás jól követhető ezzel a két dinamikus állománymérő módszerrel. A mikrohullámú hőkezelés hatására a sárgarépa minta felületének egyenletes ütemű puhulása figyelhető meg. Az alacsony hőkezelési szinten a termény globális keménysége csak kismértékben változott, azonban bizonyos dózis felett egy szignifikáns puhulás volt észlelhető.

A dielektromos mérések alapján elmondható, hogy a répa dielektromos jellemzői -a globális keménységhez hasonlóan- csak kismértékben változtak a hőkezelés elején, majd a sárgarépakorongok állománya szignifikánsan megváltozott kb. 550 Ws/g dózis felett, ami az impedancia és a fázisszög ugrásszerű változását vonta maga után. Ilyen dóziséval kezelés hatására a sejt fal valószínűleg roncsolódik és a sejtplazma a sejt közötti térbe jut, ezért jelentkezik a dielektromos tulajdonságokban az ugrásszerű változás. Ezt bizonyítják a répa sejtekről készült elektronmikroszkópos felvételek is. Az említett ugrásszerű változás megfigyelhető volt, mind az egészben, mind a répakorongon mérve.

## 5.4 In-vivo kísérletek akusztikus módszerrel

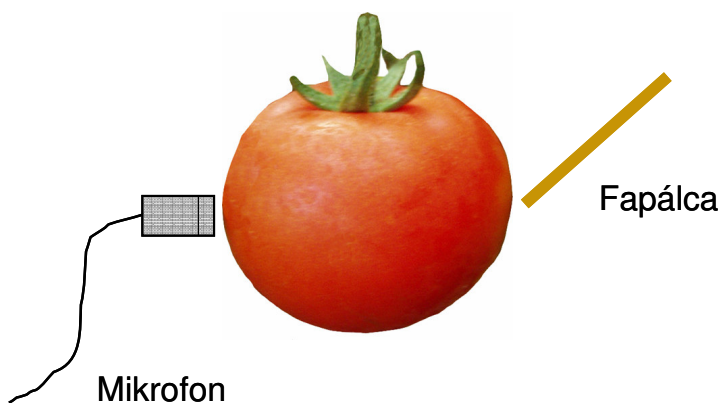
Ahogy az irodalmi áttekintés alapján nyilvánvaló, az akusztikus módszer számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik. Először is roncsolásmentes, ebből fakadóan lehetőséget nyújt egy termény többszöri vizsgálatára, és az állományváltozás pontos követésére. Felföldi és Fekete (2003a, b) publikálták, hogy az akusztikus módszer a mikro változások detektálására is alkalmas. Ezen felül egyszerű kialakításának is köszönhetően nemcsak laboratóriumban, hanem szabadföldi körülmények között is végezhetünk akusztikus méréseket. Tehát az akusztikus módszer nagyon ígéretes technika in-vivo mérések esetében is.

A fejlődés, érés közben történő keménységvizsgálatok egy érdekes, új, eddig még kevésbé tanulmányozott kutatási területe az akusztikus mérésnek. Segítségével lehetőség nyílik az élettani folyamatok mélyebb tanulmányozására, illetve feltehető, hogy segítségével posztharvest szempontból is fontos információhoz jutunk a szedés ütemezését illetően.

### 5.4.1 A növényen lévő paradicsombogyó akusztikus jelének vizsgálata

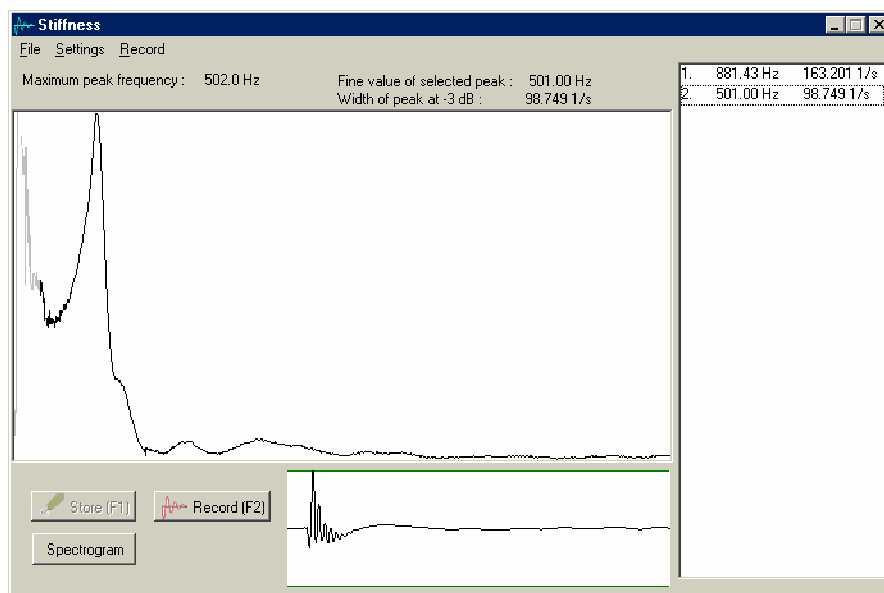
A kísérlet elkezdése előtt vizsgálatokat végeztem, hogy milyen mérési elrendezésben, milyen mérethatárok mellett mérhető a növényen lévő paradicsombogyó akusztikus hangválasza.

Akusztikus vizsgálatra megfelelőnek bizonyult az a mérési technika, amikor a növényen lógó paradicsom az egyenlítő mentén került gerjesztésre és a kialakult rezgést egy mikrofon rögzítette a gerjesztéssel átellenes oldal egyenlítője mentén (52. ábra). Ezt az elrendezést használta Felföldi és Fekete (2003, 2003a) alma, és Vandewalle és tsai (1994) alma illetve paradicsom in-vivo vizsgálatainál.



**52. ábra:** Mérési elrendezés a paradicsom növényen történő mérésére

Az így kapott akusztikus válaszjelet az 53. ábra illusztrálja.



**53. ábra:** A növényen vizsgált paradicsom akusztikus válasza

Az ábrán látható, hogy az ily módon kapott jel spektruma teljesen egyértelmű, egy domináns csúcsot tartalmaz.

A kísérletek célja az volt, hogy végigkövessem a paradicsombogyó állományváltozását a fejlődése, illetve az érése során. Előzetes tapasztalataim arra utaltak, hogy az akusztikus jelválasz kialakulása, a kapott jel szintje erősen méretfüggő, egy bizonyos mérethatár alatt általában ki sem alakul rezonancia. Ezért vizsgáltam, hogy milyen méretű az a legkisebb bogyó, aminek még ilyen elrendezés mellett mérhető jele van.

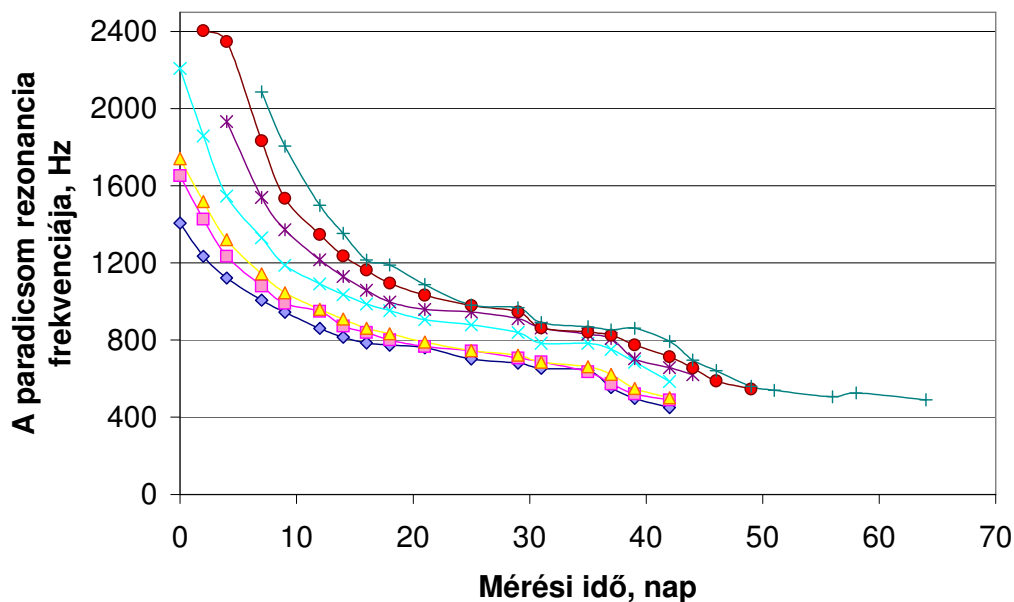
Azt tapasztaltam, hogy a kb. 20 mm átmérőnél kisebb bogyó esetén az akusztikus jele/zaj viszony igen alacsony, ebből következően a spektrum nehezen kiértékelhető, igen összetett, azaz domináns, kiemelkedő csúcs nem található. Ennél kisebb bogyó tehát már nem mérhető. A bogyó növekedésével vált egyre egyértelműbbé a kapott jel. Kb. 30 mm átmérőjű bogyó esetében már az 53. ábrán bemutatott egyértelmű jel érzékelhető. Tehát a méréseimet a 3 cm-nél nagyobb átmérőjű paradicsomokkal végeztem el.

A méréseknél további nehézséget okozott az, hogy a paradicsomok (Preciza és Boderine) fűrtökben nőttek, ezért az egyes bogyókhoz történő hozzáférés néhol nehézkes volt. A fűrtös paradicsom előnye viszont az, hogy a növény ugyanazon termésszakaszából, egyidejűleg különböző érettségi állapotú mintákat vizsgálhattam.

#### **5.4.2 A fejlődés és érés során kapott jellemző rezonancia frekvenciaértékeinek változása**

A méréseket a két paradicsomfajtán 2-3 naponta végeztem több, mint 2 hónapon keresztül. A kísérlet során ügyeltem arra, hogy a mintákat a nap ugyanazon szakában mérjem, elkerülve azt,

hogy a napi keménység-ingadozások megzavarják a mérési eredményeket. A bogyó akusztikus keménységváltozását végigkövettem a fejlődésen, (a bogyónövekedésen) keresztül egészen a színesedésig, pirosodásig, tehát a szedésig. Az így kapott frekvenciaértékek változását egy fürtön bemutatva az 54. ábra szemlélteti.



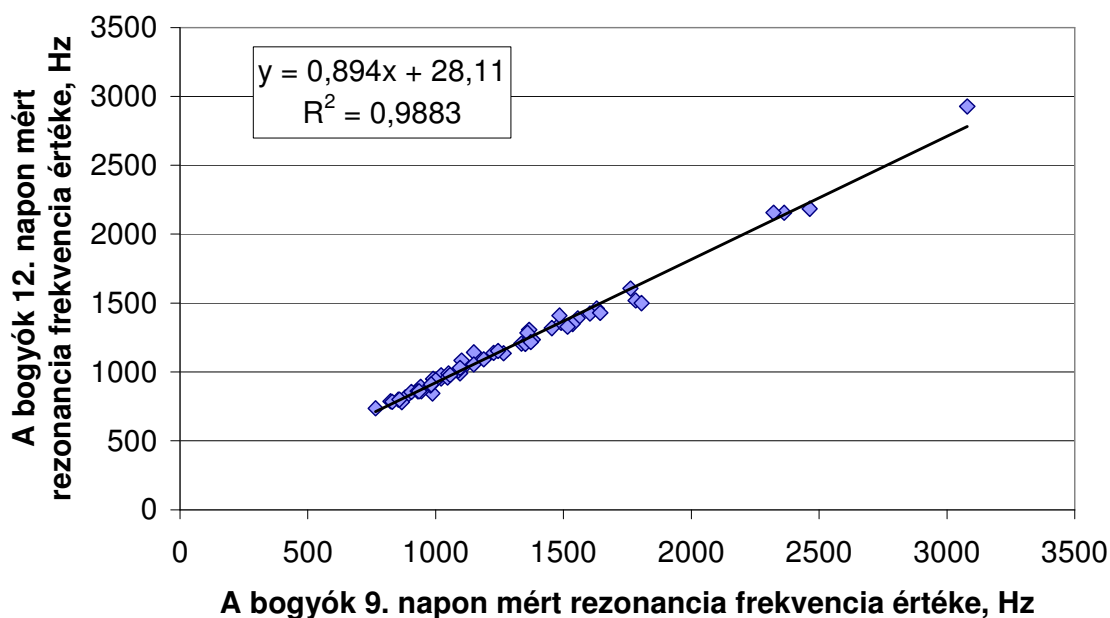
**54. ábra:** Egy fürtön lévő paradicsombogyók rezonancia frekvenciáinak változása az idő függvényében (Boderine fajta)

Az ábráról jól látható, hogy a fejlődés-érés során bekövetkező rezonancia frekvenciaváltozás egy csökkenő változás. A csökkenés két szakaszra bontható. A folyamat elején egy aszimptotikus függvénnyel közelíthető változás figyelhető meg, majd a folyamat megszakadta (leszedés) előtti néhány mérési nappal egy ugrásszerű csökkenés tapasztalható, ahonnan a rezonancia frekvencia kisebb intenzitással, de tovább csökken.

Az egyes paradicsombogyók egymást követő mérési alkalmakkor kapott rezonanciafrekvencia értékei nagymértékben korreláltak egymással, függetlenül a fajtától, a fürt korától, a bogyó méretétől és érettségi állapotától. Ezt mutatja be az 55. ábra is. Az ábra elkészítéséhez 57 paradicsom rezonancia frekvenciáját használtam fel és a kapott korrelációs koefficiens 0,9953 volt.

Ez is mutatja, hogy az akusztikus vizsgálat nemcsak a tökéletesen beállított laboratóriumi mérések során képes a nagyfokú reprodukálhatóságra, hanem a szabadföldön, mérési alkalmanként folyamatosan változó minta esetében is.





**55. ábra:** A paradicsombogyók egymást követő mérési napok során kapott rezonancia frekvencia értékei közötti összefüggés

#### 5.4.3 A paradicsombogyók térfogatváltozása a kísérlet során

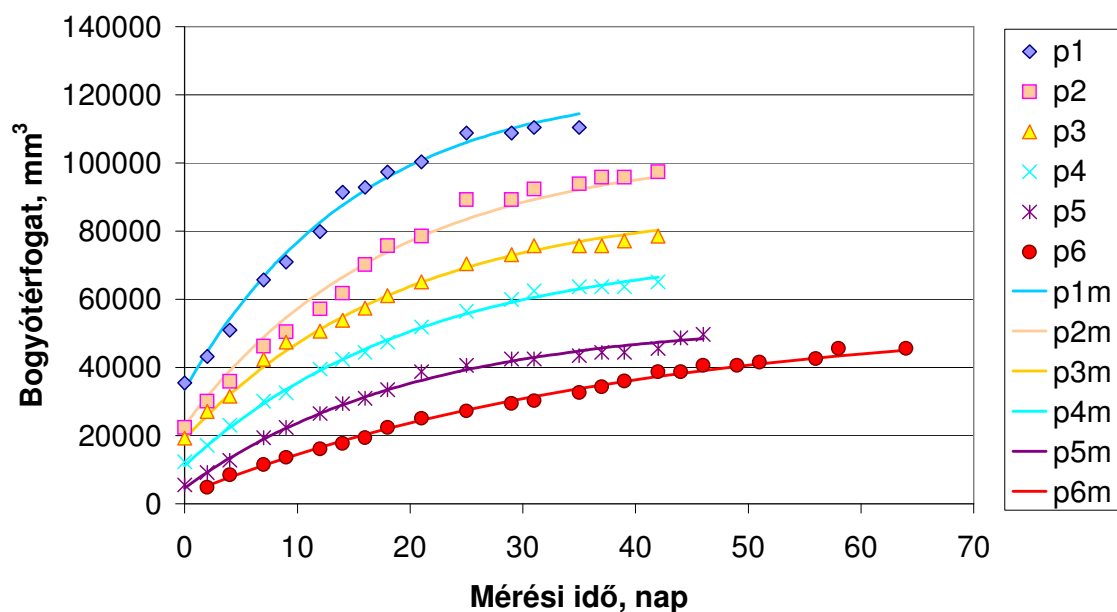
A keménységtényező kiszámításához nem elég a termés jellemző frekvenciájának ismerete, hanem szükségünk van annak geometriai paraméterére, illetve tömegére. A minta tömegének mérése elég nehézkes a növényen, főleg fűrtökben termő bogyók esetében, így a minta tömegét a jellemző méretei segítségével becsültem meg. Minden egyes alkalommal három paramétert (két egymásra merőleges átmérőt, és a magasságot) mértem tolómérővel. Minden méretet 1 mm pontossággal adtam meg, mert ennél nagyobb pontosság az élő szövet rugalmasságából adódóan nem érhető el.

A bogyók fajtajellegből adódóan ellipszoid alakúak voltak, így a mért adatokból a

$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{\text{átmérő}_1}{2} \cdot \frac{\text{átmérő}_2}{2} \cdot \frac{\text{magasság}}{2}$  képlet segítségével kiszámítottam az ellipszoid térfogatát.

Egy fűrtön lévő néhány bogyó térfogatváltozását az 56. ábra illusztrálja az idő előrehaladtával.

Az ábra mutatja, hogy a térfogat-növekedés monoton volt a kísérlet alatt. A bizonytalanságoknak köszönhetően az adatpontokban egy enyhe véletlenszerű változás is tapasztalható. Ez a „nem egyenletes” változás nemcsak véletlen hibának, hanem mérési hibának köszönhető. Ennek a mérési hibának a nagyságát a hibaterjedési törvény segítségével becsültem.



**56. ábra:** Egy fűtőn lévő bogyók térfogat növekedése a kísérlet alatt

Egy átlagos paradicsomot vettem alapul, aminek a méretei:  $d_1=60$  mm,  $d_2=60$  mm,  $h=45$  mm, ahol  $d_1$  az első,  $d_2$  a második átmérő és  $h$  pedig a magasság. A hibaterjedési törvénybe való behelyettesítés és kiszámítás után megkapjuk, hogy ennek az átlagosnak mondható paradicsomnak a térfogata 99,7 %-os megbízhatósági szinten a következő:  $V = 8,482 \cdot 10^{-5} \pm 1,373 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ . Megvizsgálva a térfogatot és a hozzá tartozó bizonytalanságot egyszerűen kiszámítható, hogy az átlagosnak kiválasztott paradicsom térfogatbecslésénél a keletkezett hiba  $\pm 1,6$  %. Az is nyilvánvaló, hogy ez a hiba függ a paradicsom méreteitől. Kisebb paradicsom esetében ez a hiba nagyobb, míg nagyobb paradicsom esetében kisebb lesz. Tehát megállapítható, hogy a paradicsom térfogata ilyen módszerrel kb.  $\pm 2$  %-os biztonsággal becsülhető. A hibaterjedési törvény levezetése a Mellékletben található meg (10.2. fejezet).

Egyes esetekben, pl. a p1-es és a p2-es bogyónál látható, hogy a keletkezett változás egyes napoknál valószínű több, mint  $\pm 2$  %-os. Ez a hiba feltehetőleg nemcsak a három méret 1 mm-es bizonytalanságból adódott, hanem egyéb mérési hibának is köszönhető. Plusz hiba lehet a méréseknél az, hogy a bogyók méreteinek meghatározásakor -a két hónapos kísérlet alatt- nem tudtam a paradicsom pontosan ugyanazon pontjai közötti távolságot mérni. Ez elég nehéz feladat, hiszen a paradicsom egy élő, biológiai szervezet, amely napról napra változik, fejlődik.

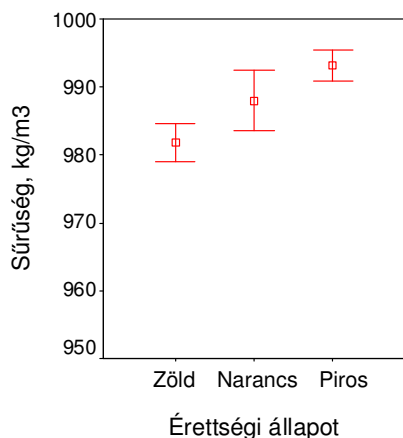
Mivel a paradicsom növekedése és érése során a mérési alkalmak között (2-3 naponként) várhatóan csak kis változások következnek be, a keletkezett mérési hibát megpróbáltam kiküszöbölni. Ezért a kapott adatokra az Excel program Solver bővítményének segítségével egy telítési függvényt illesztettem, mert feltételezésem szerint a modell jobb leírását adja az aktuális térfogatnak, mint a

pillanatnyi mért értékek. Ezzel elkerülhető, az hogy mérési hibákkal elfedjek, vagy létrehozzak olyan változást, ami valójában nem következett be. Az adatokra illesztett görbét az 56. ábra jelmagyarázatában „m” indexszel jelöltem. A modell általános alakja a következő volt:  $y = A + B \cdot (1 - e^{-c \cdot x})$ . E gondolatment alapján a modell által meghatározott értékeket tekintettem az egyes mérési időponthoz tartozó adatnak.

Az 56. ábrán az 1-6-ig tartó indexek a bogyók korát jelölik. Az 1-es számú fejlődött ki a legkorábban, míg a 6-os volt az utolsó bogyó a fürtön. A diagramot megfigyelve látható, hogy a fiatalabb bogyók nem nőttek meg akkorára, mint az első, azonban ezek is beértek, pirosak lettek. Ugyanez fajtától függetlenül jellemző volt a többi fürtre is.

#### 5.4.4 A paradicsomok sűrűségének vizsgálata

Ahhoz, hogy a minta tömegét becsülhessem a térfogaton kívül szükségem volt annak sűrűségére is. A sűrűség becslésére különböző korú (érettségi állapotú) bogyókat szedtem le és mértem azok sűrűségét. A bogyók nagysága nem tükrözte az érettségi állapotot, hiszen volt ugyanolyan méretű, de még növekedésben lévő zöld bogyó és már érett, piros bogyó is. Ezért az érettségi állapotot vizuálisan, szín alapján határoztam meg. A vizsgálathoz több mint 80 darab, különböző érettségi állapotú paradicsomot használtam fel. A kapott eredmények az 57. ábra szemlélteti.



**57. ábra:** A paradicsom sűrűségének változása fejlődés-érés során



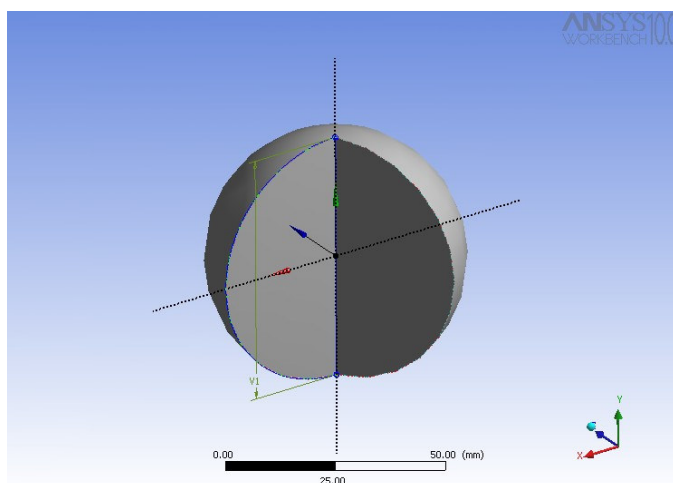
**58. ábra:** Különböző érettségi állapotú paradicsomok keresztmetszete

Az 57. ábráról megfigyelhető, hogy a paradicsom bogyók sűrűsége folyamatosan nő a fejlődés és érés során. Ha különböző érettségi állapotú paradicsomokat kettévágunk (58. ábra) láthatjuk, hogy a sűrűségváltozás valószínűleg a paradicsombogyó fejlődés illetve érés során bekövetkező szerkezeti átalakulásnak köszönhető. Látható, hogy a külső terméshártya egyre vastagodik a fejlődési-érési folyamat során, és a kolumella (a magokat illetve a kocsányos anyagot tartó rész) egyre kisebbé válik és helyét a placenta (lédús kocsonyás anyag) foglalja el. Valószínű, hogy placenta sűrűsége

magasabb (víz közelebb), mint a kolumella sűrűsége és a kettő arányának megváltozásából adódhat a sűrűségváltozás a folyamat alatt.

Az 57. ábrán az is látható, hogy ez a változás kb.  $15\text{--}20\text{ kg/m}^3$  ( $975\text{--}995\text{ kg/m}^3$  közötti), ami 1,5-2 %-os sűrűségváltozásnak felel meg.

Továbbiakban az ebből adódó hibát is meghatároztam. Végeselem módszer (Ansys 10.0) segítségével vizsgáltam, hogy ez a sűrűségváltozás milyen hatással lehet a bogyó rezonancia frekvenciájára. Ezért létrehoztam egy átlagos méretű (60 mm átmérőjű) gömböt, és a sűrűség függvényében vizsgáltam a bekövetkező rezonancia frekvenciaváltozást. A testet homogén, elasztikus, lineáris anyagnak tekintettem. A készített testet metszetben az 59. ábra mutatja be.



Átmérő: 60 mm

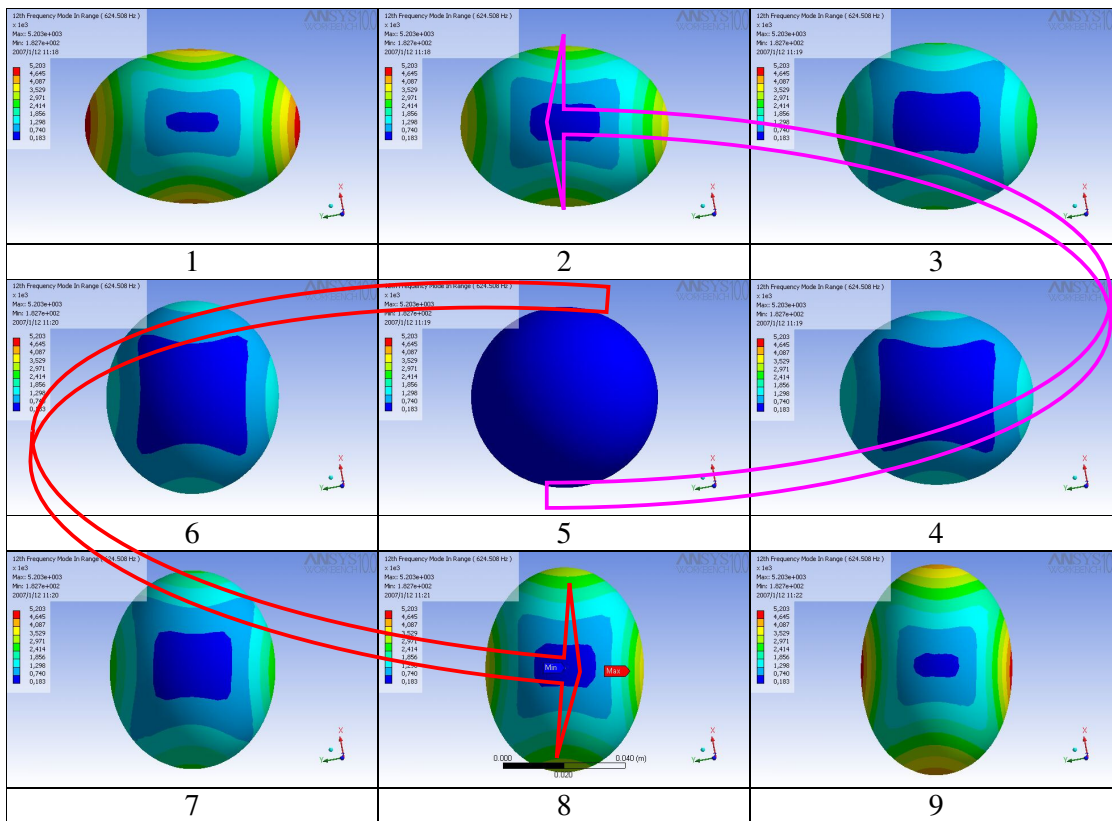
Sűrűség:  $985\text{ kg/m}^3$

Young modulus: 5 MPa

Poisson arány: 0,35

**59. ábra:** a létrehozott test metszete és anyagi tulajdonságai

A geometria létrehozása után a rezgéselemzés következett. A modell egyes pontjainak rezgéseit nem korlátoztam, tehát nem rögzítettem egyetlen egy pontját sem, minden pont elmozdulhatott x, y és z irányba, azaz 3 szabadsági fokkal rendelkezett. A létrejövő rezgési módok közül a lélegző vagy gömb módot vizsgáltam. Ennek a rezgéstípusnak, ilyen paraméterű gömb esetében a legalacsonyabb módusa a 12. módus. A 12. módus rezgése során bekövetkező deformációt a 60. ábra mutatja be. Az ábrán a különböző színek a különböző mértékű deformációt jelentik (a piros a legmagasabbat, míg a kék a legkisebb mértékűt). A rezgés az 5. számú ábrától indul és az első szakaszban (piros nyíl) a 9. ábráig tart. Ekkor oldal irányban rövidül, míg hosszirányban megnyúlik, majd visszaalakul a kiindulási állapotba (9-5. kép). Ezután az 5-ös képtől az 1-es képig bemutatott változás játszódik le (rózsaszín nyíl), a test hosszirányban összenyomódik, míg szélességében megnyúlik. Egy teljes rezgés utolsó fázisa az 1-5-ig tartó visszaalakulás. Majd újra kezdődik a rezgés egyre kisebb amplitúdóval.



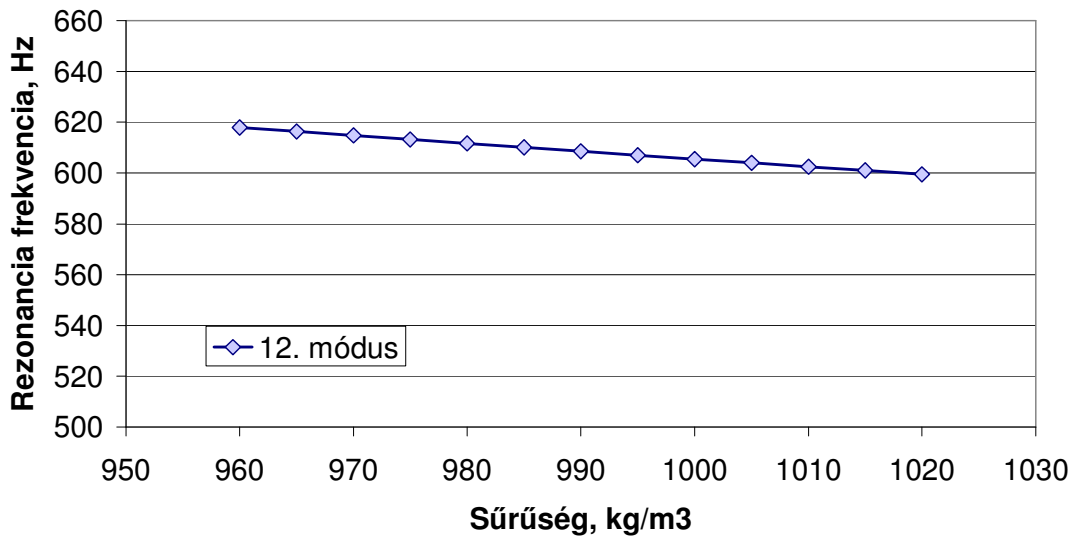
**60. ábra:** A lélegző mód során bekövetkező deformáció gömb esetében

Az objektum első 20 módalakját számítottam ki a programmal. A szabad rezgésnek köszönhetően az első 6 módus frekvenciája 0 Hz körüli volt. Az elemzésből az is kiderült, hogy az egyre magasabb módusok egyre összetettebb rezgést írtak le. Ezek a megfigyelések megegyeznek Jancsók et al. (2001a) cikkében leírtakkal.

A sűrűségváltozás hatására bekövetkező frekvenciaváltozás (12. módus) a 61. ábrán látható. A frekvenciaváltozást a 960 és az 1020 kg/m<sup>3</sup>-es sűrűségtartományban vizsgáltam. Ez a tartomány tartalmazza a paradicsom növekedése során tapasztalt (975-995 kg/m<sup>3</sup>) sűrűségváltozást.

Az ábráról látszik, hogy a 60 kg/m<sup>3</sup>-es sűrűségváltozás során a frekvencia kevesebb, mint 20 Hz-et, csak 3 %-ot változott. A 975 és 995 kg/m<sup>3</sup>-es tartományba eső sűrűségváltozás 6,19 Hz-es változást okozott a frekvenciában, ami kb. 1 %-os változásnak felel meg.

Most vizsgáljuk meg, hogy a tömeg becslése milyen hibával történt. A tömeg becslése a térfogatmérés, illetve a sűrűségváltozás hibájával terhelt. A térfogatbecslés hibáját az előzőekben már kiszámítottam. Ha előzőekben használt térfogatot, tehát  $8,482 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ -t és egy átlagos sűrűséget, pl. 985 kg/m<sup>3</sup>-t használunk a számításhoz, akkor a behelyettesítés és a kiszámítás után ezt kapjuk:  $\sigma_m^2 = 7,994 \cdot 10^{-2} + 2,034 \cdot 10^{-1}$ . Az első tag a sűrűségváltozás hibájából keletkezett, míg a



**61. ábra:** A rezonancia frekvencia változása a sűrűség függvényében

második a geometriai paraméterek lemérésének hibájából. Látható, hogy a térfogatbecslésének hibája 2,5-ször nagyobb, mint a sűrűségváltozásból adódó hiba. A tömegbecslés hibája  $\sigma_m^2 = 0,2834 \text{ g}^2$ , azaz  $\sigma_m = 0,5323 \text{ g}$ . Tehát ilyen paraméterű paradicsom tömege 99,7 %-os biztonsággal  $83,55 \pm 1,597 \text{ g}$ , ami azt jelenti, hogy a tömeg  $\pm 1,91$  tehát kb.  $\pm 2\%$ -os hibával becsülhető. A hibaterjedés levezetése a Mellékletben található (10.3. fejezet).

Az előzőekből következik, hogy a fejlődés és érés során bekövetkező sűrűségváltozás mind a rezonancia frekvenciára, mind a tömegbecslésre alig volt hatással (kisebb, mint 1 %). Így a sűrűségváltozást elhanyagolható mértékűnek találtam az akusztikus keménységtényezőre nézve. Továbbiakban minden egyes paradicsomot  $985 \text{ kg/m}^3$ -es sűrűségűnek vettem és ezzel számoltam tovább.

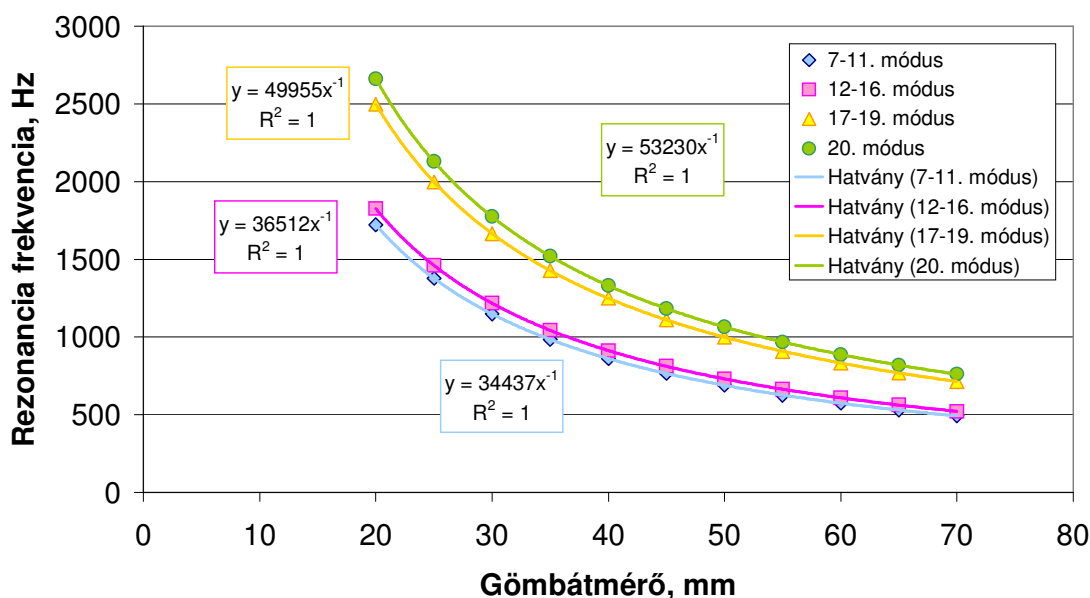
#### 5.4.5 A paradicsombogyók akusztikus keménységtényezőjének változása a kísérleti idő alatt

A bogyótömegek becslése után már kiszámolható a paradicsom akusztikus keménységtényezője. Felmerül azonban a kérdés, hogy *melyik akusztikus keménységtényezőt használjam a paradicsom keménységének követésére in-vivo mérés során?*

Háromféle keménységtényező jöhet számításba: az  $S_1 = f^2 \cdot m$ ,  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  és  $S_3 = f^2 \cdot d^2$ , ahol az  $f$  a termény rezonancia frekvenciája (Hz),  $m$  a tömege (g), és  $d$  pedig az átmérője az egyenlítő mentén mérve (mm).

Annak eldöntésére, hogy melyik a megfelelő, ismét a végeselem modellezést használtam. Az előzőekben leírt gömb alakú test rezgéseit vizsgáltam tovább. A fejlődés és érés során bekövetkező

változásokat, tehát a bogyó növekedését és puhulását szimuláltam. A növekedés során kapott frekvenciaváltozás a 62. ábrán látható. Az ábrákon nemcsak az előzőekben vizsgált 12. módus frekvenciáit ábrázoltam, hanem a 7-től a 20. módusig.



**62. ábra:** A gömb alakú test rezonancia frekvenciájának változása a szimulált növekedés során

Az ábrán látható, hogy a 7-20. módus 4 görbével ábrázolható. Ennek oka, hogy egy-egy rezgési típus több módusnál is jelentkezik. Például a gömbnél észlelt 12-16. módus mindegyike gömb módus. Ezen módusok rezonancia frekvenciái a gömb esetében alig (<0,003 %) különböznek egymástól. A számszerű értékeket a Mellékletben a 11. táblázatában láthatjuk.

Érdeemes megfigyelni az ábrán, hogy az egyes rezgési típusok frekvenciaváltozása a növekedés hatására ugyanolyan mértékű csökkenést mutatott. Tehát az egyes rezgési módusok együtt változtak az átmérő módosulásával, tehát ezek közül a módusok közül mindegyik leírja a történt változást. Ebből következik, hogy bármelyik módot használhatjuk a termés jellemzésére, azonban minden egyes alkalommal ugyanazt a rezgési módot kell megfigyelnünk. Ezek a következtetések az idealizált gömbalakra vonatkoznak. Kevésbé szimmetrikus alak (pl. egy valós gyümölcs) esetében, az ugyanolyan rezgési típusba tartozó módusok rezonancia frekvenciái között nagyobb eltérés tapasztalható, mint gömb esetében. Ez irodalmi adatokkal (pl.: H. Chen és J. De Baerdemaker (1992, 1993, 1993a, 1996)) is alátámasztható.

További figyelemre méltó, s az ábrán jól látható dolog, hogy mindegyik görbére reciproktól függvény illeszthető, azaz a frekvencia reciproka és az átmérő közötti összefüggés lineáris. Vizsgáljuk meg ezek alapján a szóba jöhető három akusztikus keménységi tényezőt. A sűrűség változását elhanyagolhatónak tekintettem.



$$1. \quad S_1 = f^2 \cdot m : \quad f^2 = \frac{S_1}{m}, \text{ tehát } f^2 \sim m^{-1}, f \sim \sqrt{m^{-1}} \quad \text{továbbiakban}$$

tudjuk, hogy  $\rho = \frac{m}{V}$ , tehát  $m \sim V$ , illetve az is ismert, hogy gömb esetében  $V = \frac{d^3 \cdot \pi}{6}$ .

Mivel  $V \sim d^3$ , így  $m$  is  $\sim d^3$ -bel, ezért az első keménységtényező esetében,  $f \sim \sqrt{(d^3)^{-1}}$  azaz  $f \sim d^{-3/2}$ .

$$2. \quad S_2 = f^2 \cdot m^{2/3} : \quad f^2 = \frac{S_2}{m^{2/3}}, \text{ tehát } f^2 \sim m^{-2/3}, f \sim \sqrt{m^{-2/3}}, \text{ még mindig igaz,}$$

hogy  $m \sim d^3$ , ezért  $f \sim \sqrt{(d^3)^{-2/3}}$ . Tehát a második keménységtényezővel számolva  $f \sim d^{-1}$ .

$$3. \quad S_3 = f^2 \cdot d^2 : \quad f^2 = \frac{S_3}{d^2}, \text{ tehát } f^2 \sim d^{-2}, \text{ így a harmadik keménységtényezőt}$$

használva  $f \sim \sqrt{d^{-2}}$  azaz  $f \sim d^{-1}$ .

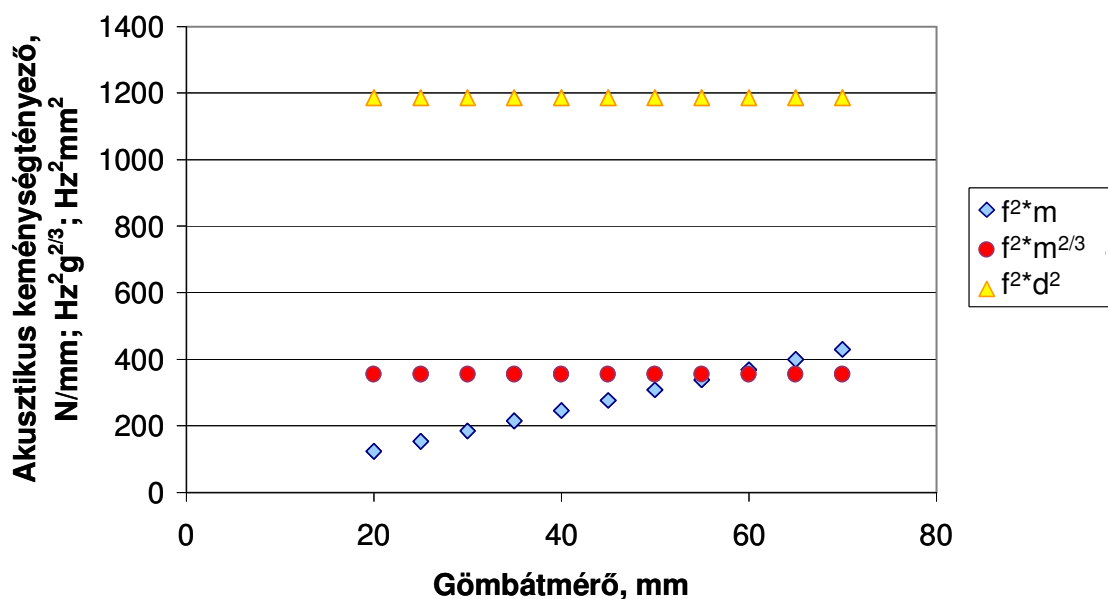
Ezek alapján megállapítható, hogy az első keménységtényező esetében a frekvencia és az átmérő közötti összefüggés nem reciprokos. A másik két keménységtényező esetében kapott reciprokos összefüggés, pedig megegyezik a modellezéssel kapott eredménnyel. Ezért elmondható, hogy az első keménységtényező, az  $S_1 = f^2 \cdot m$  nem alkalmas a növekedés alatti változás pontos követésére.

Ezt alátámasztja a 63. ábra is, ahol a szimulációban kapott paraméterekkel számítottam ki a háromféle keménységtényezőt. A szimuláció alatt csak a test átmérője változott, a Young modulusa nem. Tehát ha kiszámítjuk a keménységtényezőket, akkor az átmérő változásával nem szabad, hogy a keménységtényező is változzon.

Az ábráról szintén látható, hogy az  $S_1 = f^2 \cdot m$ -es összefüggéssel kapott eredmény az átmérő változásával módosul, tehát nem alkalmas a növekedés alatt a keménység jellemzésére, azonban az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  és az  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  igen.

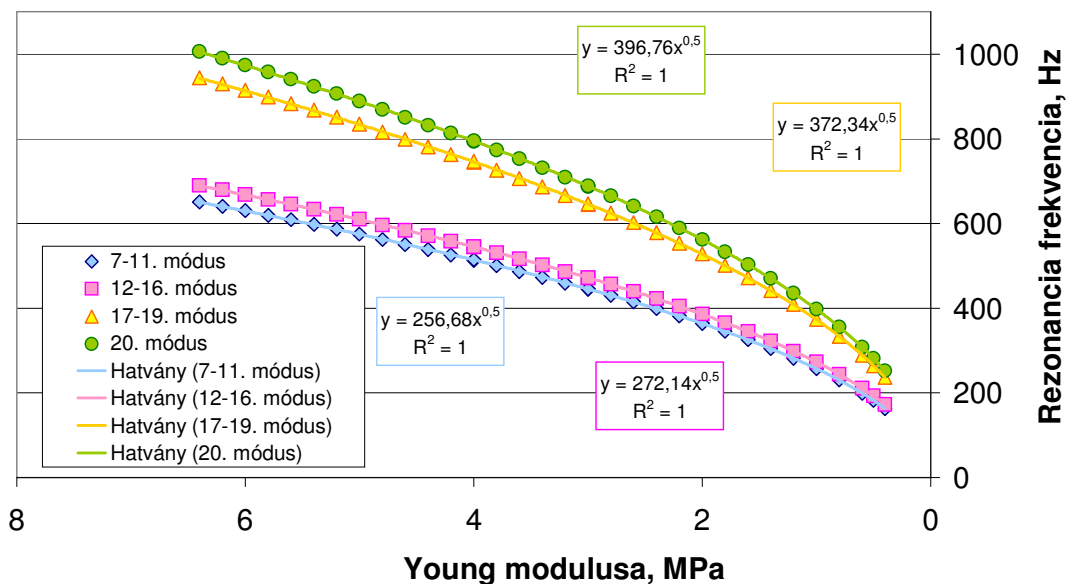
Meg kell jegyezni, hogy konstans sűrűség és gömb alak esetében az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  és az  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  összefüggéssel kapott keménységtényezők csak konstans szorzóban különböznek, azonban valós termény esetében mindkét keménységtényező reális alternatíva lehet.





**63. ábra:** A háromféle akusztikus keménységtényező változása a növekedés alatt

A következőkben azt vizsgáltam meg, hogyan változik a frekvencia a puhulás során. A puhulás szimulálására a végeelem modellben a Young modulust 0,4-6,4 MPa határok között változtattam. A határok kiválasztásához az ASAE S368.4 DEC00 Standard-t használtam fel, ahol néhány zöldség és gyümölcs Young modulusa közlésre került. A szimulált puhulás alatti változás a 64. ábrán látható. Itt is a 7-20. módusokat ábrázoltam.



**64.ábra:** A gömb alakú test rezonancia frekvenciájának változása a szimulált puhulás során

Ennél az ábránál is megfigyelhető, hogy a különböző módusok 4 görbével leírhatók és a különböző rezgés típusok ugyanolyan tendenciát mutatnak. Itt is az ugyanolyan típusú rezgések közötti eltérés

gömb esetében minimális (<0,002 %) volt. Ezen adatok számszerű értéke a Mellékletben a 12. táblázatában látható.

Az is leolvasható az ábráról, hogy a puhulás, tehát a Young modulus csökkenés során bekövetkező frekvenciaváltozás egy gyök függvénnyel írható le.

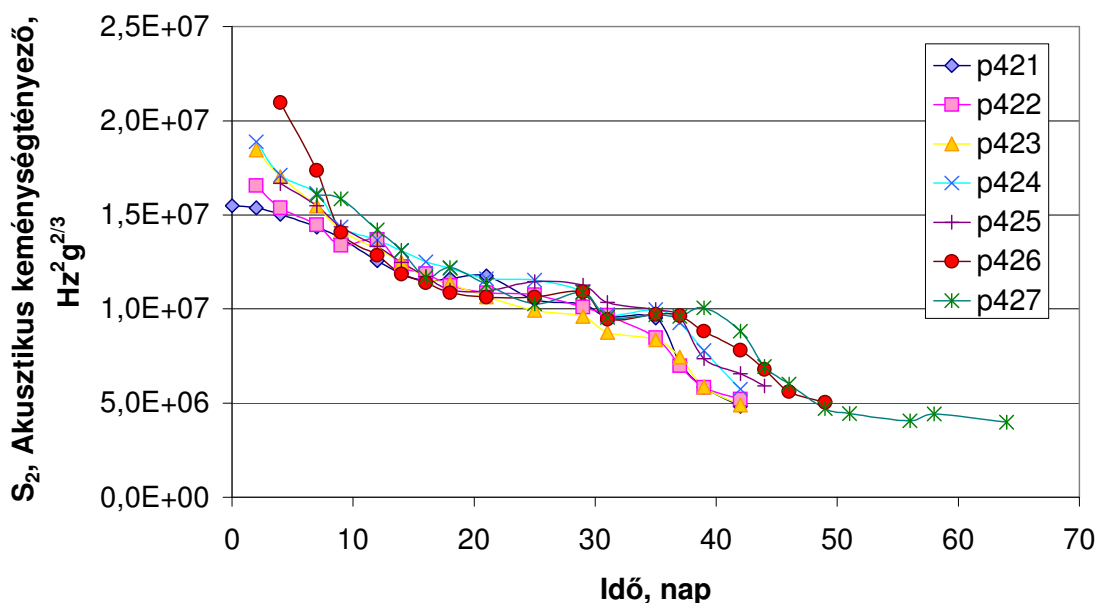
Vizsgáljuk meg ezek alapján, hogy melyik keménységtényező alkalmas a puhulási folyamat leírására.

Mind az  $S_1 = f^2 \cdot m$ , mind az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$ , mind az  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  esetében elmondható, hogy az  $S \sim f^2$ -tel, tehát  $f \sim \sqrt{S}$ . Ezek alapján elmondható, hogy a puhulás jellemzésére mindhárom keménységtényező alkalmas.

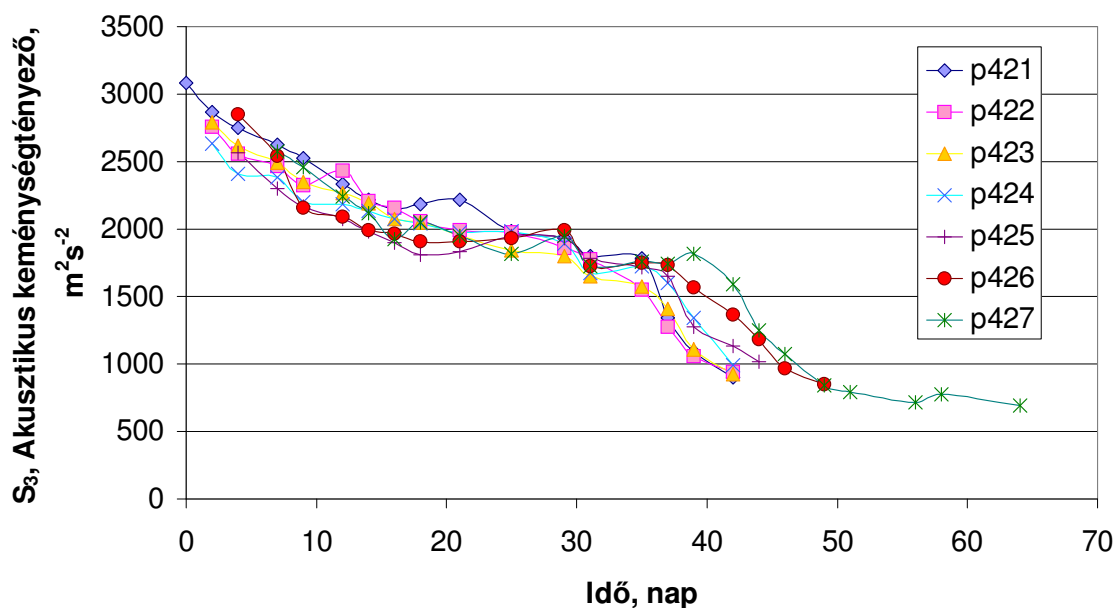
A fentiekben bemutatott gondolatmenet alapján kijelenthető, hogy a paradicsom növekedése és érése során bekövetkező keménységváltozások jellemzésére az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  illetve  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  összefüggés alkalmas. Ezzel a két keménységtényezővel megfelelő információt kaphatunk a bogyó állományáról a növekedési és a puhulási folyamat során.

#### 5.4.6 A paradicsomok keménységváltozása a növekedés és érés során

A megfelelő keménységtényező kiválasztása után már megvizsgálható a paradicsomok keménységváltozása. A két különböző keménységtényezővel kapott változást a 65. és a 66. ábrán látható.



**65. ábra:** A paradicsombogyó akusztikus keménységtényezőjének ( $S_2$ ) változása a fejlődési-érési folyamat során

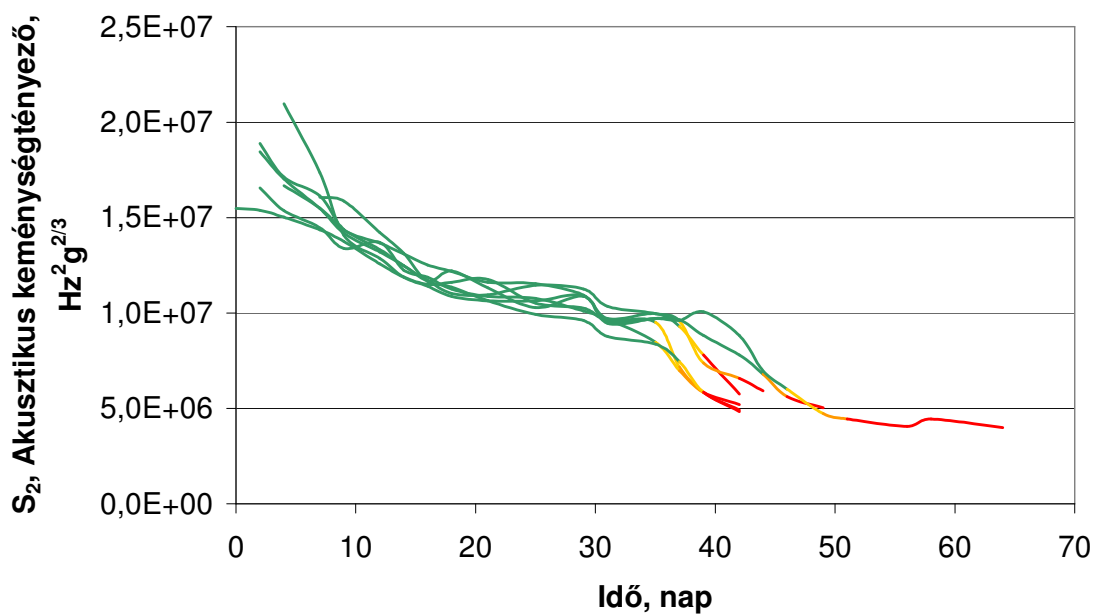


**66. ábra:** A paradicsombogyó akusztikus keménységtényezőjének ( $S_3$ ) változása a fejlődési-érés folyamat során

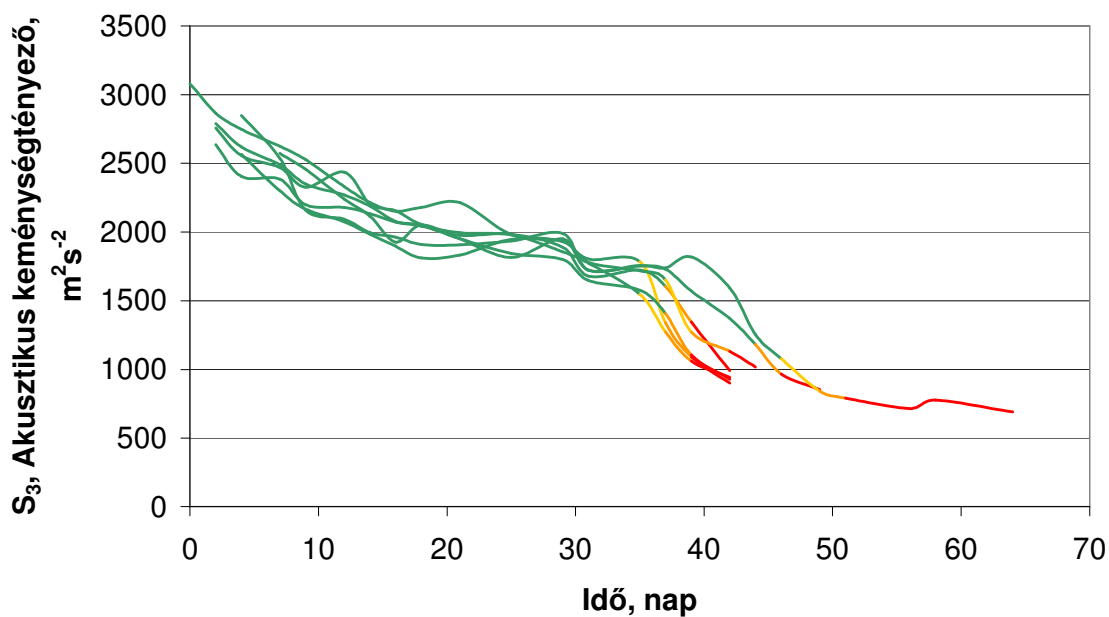
Mindkét ábrán látható, hogy a paradicsombogyók a fejlődés-érés alatt mindvégig puhultak. Elérve egy bizonyos érettségi állapotot (a bemutatott ábrán ez a mérés 35-42. napjára tehető), a bogyók keménysége ugrásszerűen lecsökkent. Az is megfigyelhető az ábrán, hogy ez az ugrásszerű puhulás a  $S_2$  esetében kb.  $1 \cdot 10^7 \text{ Hz}^2 \text{g}^{2/3}$  körüli, míg az  $S_3$  esetében kb.  $1700 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$  körüli értéknél következett be. Ezután 2-3 nap alatt annyit puhult a paradicsom, mint előtte kb. 20-25 nap alatt.

Tovább vizsgálva a kapott görbéket, egy érdekes dolgot tapasztaltam, amikor a paradicsomok színesedését összevettem a puhulási folyamattal. Az előbb bemutatott puhulási görbék színét a paradicsom színével helyettesítettem. A paradicsomok színét vizuálisan állapítottam meg. Az így kapott eredményeket a 67. és 68. ábra illusztrálja.

Mindkét ábrán látható, hogy az ugrásszerű puhulás a színesedéssel egy időben történt. A színesedési fok megállapítása szubjektív módon, műszer nélkül történt. Általában a pirosodást három kategóriába soroltam: először narancs, majd pirosas és végül piros színű lett a bogyó. Ezeket a színesedési kategóriákat többnyire három mérési időpontban észleltem. Ettől több színkategóriát, azaz egyéb árnyalatokat nem tudtam megkülönböztetni. Egyes esetekben a színváltozásból csak két kategóriát észleltem. Ez köszönhető egyrészt annak, hogy a színváltozás gyorsan történt ahhoz, hogy a 2-3 napos mérési időpontok alkalmával ez a háromlépcsős változás érzékelhető legyen. Másrészt annak, hogy az emberi színérzékelés nem olyan pontos, mint a műszeres.



**67. ábra:** Egy fűtőn lévő paradicsomok puhulása és színváltozása az idő előrehaladtával ( $S_2$ )



**68. ábra:** Egy fűtőn lévő paradicsomok puhulása és színváltozása az idő előrehaladtával ( $S_3$ )

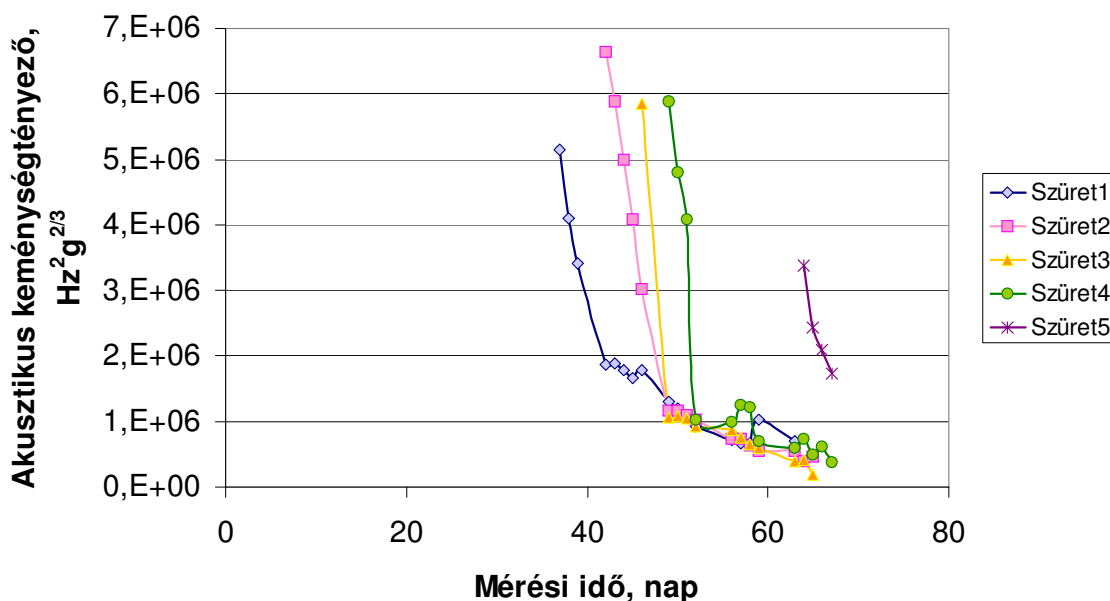
Az előzőekben bemutatott megfigyelés, miszerint a színváltozással egy időben egy jelentős puhulás is bekövetkezik a paradicsombogyó érése során, biztató eredmény, azonban ennek megerősítésére és pontos leírásához feltétlenül szükséges az akusztikus keménységmérés mellett a bogyó színének objektív vizsgálata is.

#### 5.4.7 A paradicsom bogyók tárolás alatti keménységváltozása

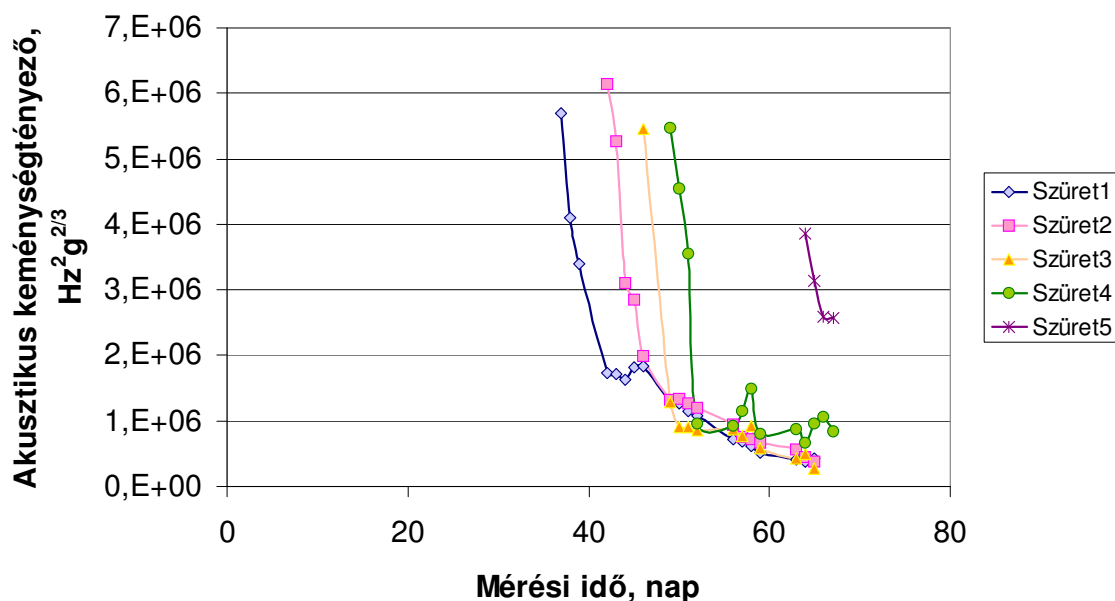
A fejlődés-érés után a már szedésre érett paradicsomokat leszedtem a töről és szobahőmérsékleten (nem kontrollált hőmérséklet és páratartalom között) tovább tároltam. Az egyes szedések között 3-5 nap telt el. A paradicsomok egy részét hagytam még kb. egy hétig a tövön túlni (szüret5) s ennek is vizsgáltam a pultontarthatóságát. A leszedett bogyókat az Anyagok és módszerek fejezetben található mérési elrendezéssel vizsgáltam.

Az összehasonlíthatóság érdekében az akusztikus keménységtényező kiszámításához érdemes a növekedés-érés során használt  $S_2$  illetve  $S_3$  összefüggések valamelyikét használni, annak ellenére, hogy a puhulást már az  $S_1$  összefüggés is megfelelően leírja. A puhulás során felléphet -a vízvesztés miatt- egy már nem elhanyagolható mértékű sűrűségváltozás, illetve egy néhány milliméteres méretváltozás is. A hosszabb idejű tárolás alatti méretváltozásról alma esetében Sass Pál (1986) is beszámolt. A  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  összefüggést a sűrűséggel kellene korrigálni, ami időigényessé tenné a vizsgálatot, illetve az átmérő meghatározása is a szövet rugalmasságából adódóan csak milliméter pontossággal történhet. Ezért véleményem szerint a pultontartás során bekövetkező puhulás leírásához célszerűbb az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  összefüggést használni, mivel az  $S_2$  összefüggés estében, mind a sűrűség-, mind a méretváltozás tömegváltozásban is jelentkezik.

Az egyes szüretekkor leszedett paradicsomok puhulását a jobb áttekinthetőség érdekében átlagoltam. A pultontartás eredményeit a Preciza fajta esetében a 69., míg a Boderine fajta esetében a 70. ábrán láthatjuk.



69. ábra: A Preciza fajta paradicsom keménységváltozása a pultontartás során

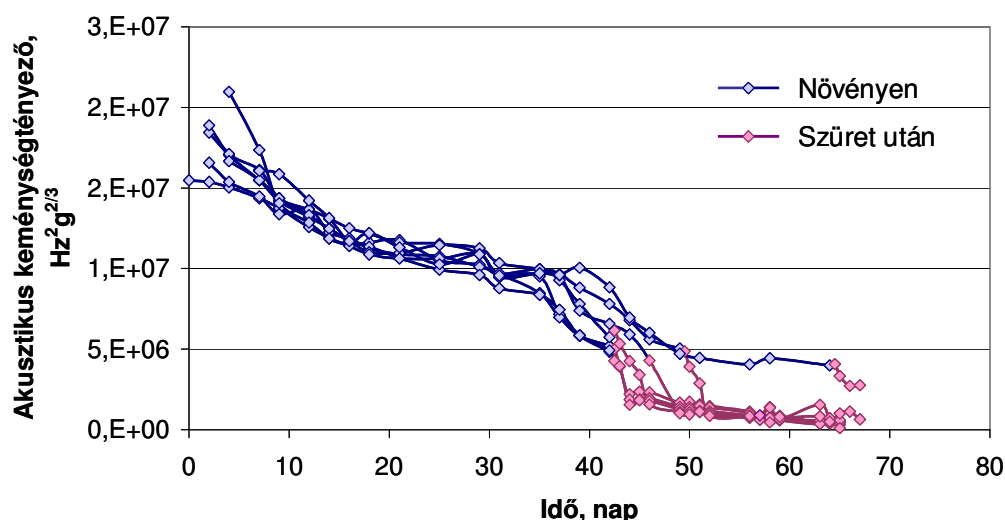


**70. ábra:** A Boderine fajta paradicsom keménységváltozása a pultontartás során

Minkét fajtánál megfigyelhető, hogy az első napokban (3-5 nap) egy nagymértékű puhulás következik be, majd egy kisebb mértékű keménységcsökkenés tapasztalható. Mindkét esetben a különböző szüretetek alkalmával szedett paradicsomok közel ugyanazt a trendet mutatták a puhulás során, bekapcsolódva egy adott puhulási folyamatba. A legkésőbb leszedett, túlérlett csoport keménysége már a tárolás kezdetén szignifikánsan puhább volt a „normál” időben leszedettekhez képest. Ezek tárolhatósága sokkal rövidebb ideig volt lehetséges, mivel a paradicsomok héja már a tövön elrepedt, így elősegítve a romlási folyamatokat.

A kísérlet során azt tapasztaltam, hogy a paradicsomok a 3-5 napos nagymértékű puhulás után is fogyasztói keménységűek maradtak még néhány napig (5-7 nap). Ezután az eladhatóságuk nagymértékben csökkent, azonban nem elsősorban a puhaságuknak, hanem a ráncosodásuknak köszönhetően.

Az előbbi vizsgálatok után már megfigyelhetjük egy fürt paradicsom keménységváltozását a növekedés, érés és pultontartás során. Ezt mutatja be a 71. ábra. A késsel jelzett szakaszban a bogyó a növényen puhult, a pultontartás során bekövetkező változást, pedig a rózsaszínű vonalak jelzik.



**71. ábra:** Egy fürtön lévő paradicsombogyó keménységváltozása fejlődés, érés és pultontartás során

Összegezve elmondható, hogy az akusztikus módszerrel lehetőségünk van nemcsak a pultontartás során, hanem a termények fejlődése, érése közben bekövetkező keménységváltozások vizsgálatára is; köszönhetően a módszer roncsolásmentességének és nagy érzékenységének. Paradicsom esetében megfelelő elrendezésnek bizonyult a mérésre az egyenlítőn való gerjesztés és az ellentétes oldalon történő érzékelés. Ebben az összeállításban egyértelmű, zavaroktól mentes hangválasz detektálható. A kapott rezonancia frekvenciaérték egymás utáni mérési alkalmakkor kapott adatai közötti korreláció nagy reprodukálhatóságra utal. Az akusztikus keménységtényező kiszámításához a frekvencia mellett szükséges még egyéb geometriából és sűrűségből adódó paraméter ismerete is. A paradicsom térfogatváltozása a fejlődés során egy telítési függvénnyel közelíthető. A paradicsom tömege becsülhető méretei alapján. A méretek meghatározása tolómérővel 1 mm pontossággal lehetséges az élőszövet rugalmasságából adódóan. A bogyó sűrűsége kb. 15-20 kg/m<sup>3</sup>-t változik az érés-fejlődés során. Hibaterjedési törvény segítségével megállapítottam, hogy a sűrűségváltozásból bekövetkező hiba 2,5-szer kisebb, mint a bogyó méreteinek meghatározásakor elkövetett mérési hiba, ezért a folyamat során bekövetkező sűrűségváltozás elhanyagolható mértékűnek ítéltm. A megfelelő keménységtényező kiválasztásában az Ansys végeelem modellező program volt segítségemre. Ezek alapján elmondható, hogy a növekedés során a frekvenciaváltozás egy reciprok, míg a puhulás során bekövetkező változás egy négyzetgyök függvénnyel írható le. Ezen információ birtokában megvizsgálva a keménységtényezőket elmondható, hogy a növekedés alatti változás az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  illetve az  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  összefüggéssel jól követhető, míg a  $S_1 = f^2 \cdot m$  nem alkalmas a növekedés során bekövetkező keménységváltozás követésére. A puhulás jellemzésére viszont mindhárom keménységtényező alkalmas. Tehát a paradicsom in-vivo mérésre az  $S_2$  illetve az  $S_3$  összefüggés használható. A paradicsom keménységváltozásának vizsgálata során elmondható,

hogy a bogyó folyamatosan puhul fejlődés-érés során. Elérve a fejlődésben egy meghatározott időt (kort) a minta keménysége ugrásszerűen lecsökken. Ezzel párhuzamosan a bogyó zöld színe pirosra vált. A paradicsom töről való leszedését követően szobahőmérsékleten tárolva 3-5 nap alatt rohamosan puhult, majd egy kismértékű keménységvesztés volt megfigyelhető.



## **6 JAVASLATOK TOVÁBBI TUDOMÁNYOS MUNKÁRA, GYAKORLATI ALKALMAZÁSRA**

Lehetőséget látok az általam vizsgált téma folytatására az alábbi kutatási területeken:

- Élettani folyamatok pontosabb megismerése érdekében további gyümölcs- és zöldségfajok érés alatti keménységváltozásának vizsgálata akusztikus módszerrel (in-vivo mérés). A színváltozással való összehasonlítás érdekében feltétlenül javaslom a keménységmérések színméréssel való kiegészítését.
- Akusztikus módszer metodikai vizsgálata, a mérési körülmények hatásának alaposabb elemzése a kapott keménységtényezőre.
- Ütésvizsgálati és akusztikus módszeren alapuló válogató rendszer tervezése. On-line osztályozó berendezés létrehozása, felhasználása gyümölcsök, zöldségek minőségi kategóriákba történő besorolásához.
- Termények különböző körülmények hatására bekövetkező állományváltozásának vizsgálata. A puhulási folyamatot leíró modell megkeresése. Az ismert modell segítségével a kitárolás optimális időpontjának meghatározása.
- Összefüggés keresése a dinamikus és a kompressziós módszerekkel kapott keménységtényezők között.
- Akusztikus módszer alkalmazhatóságának vizsgálata további nem gömb alakú zöldségek és gyümölcsök esetében.
- Kertészeti termények minősítését segítő, roncsolásmentes keménységmérési módszereken alapuló döntéstámogató rendszer létrehozása különböző fajták, fajok esetében.

## 7 ÖSSZEFOGLALÁS

A kertészeti termékek a betakarítást, a szedést követően folyamatos változáson mennek keresztül. Ezek a változások kihatnak a termés megjelenésére, beltartalmára, így annak minőségére is. A zöldségek és a gyümölcsök minősége döntően befolyásolja azok piaci értékét, illetve értékesíthetőségét. Ezért a minőség objektív megállapítása jelentős szereppel bír mind a kereskedelem, mind a fogyasztók szempontjából. Az elmúlt néhány évtizedben számos módszert fejlesztettek ki e termékek minőségének meghatározására. Ezen módszerek két nagy csoportra, a roncsolásos és roncsolásmentes módszerekre oszthatók. Jelenleg egyre nagyobb igény mutatkozik a gyors, objektív eredményt adó, roncsolásmentes módszerek iránt. A zöldségek, gyümölcsök egyik minőségi paramétere a keménység, amit a fogyasztó is elsődleges minőségi jellemzőnek tekint. Ezért dolgozatomban az előbbi ismertetőjegyeknek megfelelő, újszerű, két roncsolásmentes módszerrel, az akusztikus és az ütésvizsgálati módszerrel foglalkoztam.

Munkám célja az akusztikus módszerrel vizsgálható termékek körének bővítése, az ütésvizsgálati módszer metodikai vizsgálata, sárgarépa hőkezelés hatására bekövetkező keménységváltozás vizsgálata akusztikus és ütésvizsgálati módszerrel, valamint a paradicsom akusztikus módszerrel történő in-vivo keménység-meghatározása volt.

Eredményeim alapján megállapítottam, hogy az általam beállított elrendezésben az akusztikus módszer paprikaegyedek esetében is használható a puhulás követésére. A kapott akusztikus jel jellemző frekvenciacsúcsa jól elkülöníthető a többi frekvencia csúcstól. Mivel a váll, illetve a csúcs megütése során kapott akusztikus keménységtényezők között nincs szignifikáns különbség és a csúcs megütésével kapott spektrumban egyetlen egy domináns csúcs látható, ezért a paprika akusztikus keménységtényezőjének meghatározásánál a paprika csúcsi részét célszerű megütni. Végelelem modellezés eredményei is megerősítették, hogy a paprika keménységváltozását tükrözi a minta rezonancia frekvenciaváltozása és a két paraméter közötti összefüggés négyzetes ( $S \sim f^2$ ). A tárolási kísérlet eredményei igazolják, hogy az akusztikus vizsgálat megfelelő módszer a paprika keménységének vizsgálatára és jól követi a tárolás során bekövetkező puhulást.

Az ütésvizsgálati módszer metodikai vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a mérési körülmények közül az impactor sebessége viszkoelasztikus anyagok esetében hatással van a kapott ütésvizsgálati keménységtényezőre. Az általam vizsgált termények közül a paprika és a paradicsom esetében az ütési sebesség okozta ütésvizsgálati keménységtényező-változás elhanyagolható volt. A további általam vizsgált termények esetében ez a hatás a kézi mérés sebesség variabilitásától függően 6-7 %-nak bizonyult. Az ütőfej anyaga befolyásolja a kapott ütésvizsgálati keménységtényezőt. Egy puha anyagból készült ütőfejjel a termés ütésvizsgálati keménységtényezőjét kisebbnek mérjük, mint egy közel azonos átmérőjű fémből készült fejjel. A

puha fejfel kapott eredmény azonban mindazon információt hordozza, amit a fém fejfel kaphatunk. Előnye, hogy csökkenthető vele a többszöri megütésre bekövetkező szöveti változás, így egy „kíméletesebb” mérést biztosít.

Megállapítottam továbbá, hogy az ütésvizsgálati és az akusztikus módszer alkalmas nemcsak a tárolás, hanem a hőkezelés okozta fizikai változások követésére is. Az eredmények azt mutatják, hogy a két dinamikus módszerrel mért keménységek más mechanikai tulajdonságot jellemeznek. A kísérletben az ütésvizsgálati módszerrel és a hagyományos keménységméréssel kapott eredmények között szoros összefüggést találtam. A minta globális keménységét jellemző akusztikus keménységtényező, valamint a minta felületi keménységét jellemző ütésvizsgálati keménységtényező különböző változáson ment keresztül a hőkezelési folyamat során. A mikrohullámú hőkezelés hatására a sárgarépminta felületének egyenletes ütemű puhulása figyelhető meg. Viszont az akusztikus keménységtényező-változás, illetve a répakorongok impedancia-változása a közölt energia függvényében logisztikus függvénnyel közelíthető.

In-vivo méréseimet összegezve elmondható, hogy az akusztikus módszerrel lehetőségünk van a termények fejlődése, érése közben bekövetkező keménységváltozások vizsgálatára is; köszönhetően a módszer roncsolásmentességének és nagy érzékenységének. Paradicsom esetében a mérésre megfelelő elrendezésnek bizonyult az egyenlítőn való gerjesztés és az ellentétes oldalon történő érzékelés. Ebben az összeállításban egyértelmű, zavaroktól mentes hangválasz detektálható. A megfelelő keménységtényező kiválasztásában az Ansys végeelem modellező program volt segítségemre. Ezek alapján elmondható, hogy a növekedés során a frekvenciaváltozás egy reciprok ( $f \sim d^{-1}$ ), míg a puhulás során bekövetkező változás egy négyzetgyök ( $f \sim \sqrt{S}$ ) függvénnyel írható le. Ezen információ birtokában megvizsgálva a keménységtényezőket elmondható, hogy a növekedés alatti változás az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$ , illetve az  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  összefüggéssel jól követhető, míg a  $S_1 = f^2 \cdot m$  nem alkalmas a növekedés során bekövetkező keménységváltozás követésére. A puhulás jellemzésére viszont mindhárom keménységtényező alkalmas. Tehát a paradicsom in-vivo mérésére az  $S_2$ , illetve az  $S_3$  összefüggés használható. A paradicsom keménységváltozásának vizsgálata során elmondható, hogy a bogyó folyamatosan puhul fejlődés-érés során. Elérve a fejlődésben egy meghatározott időt (kort) a minta keménysége ugrásszerűen lecsökken. Ezzel párhuzamosan a bogyó zöld színe pirosra vált.

## 7.1 Summary

Horticultural products are living material and continuously change after harvest. These changes affect the product's appearance, the internal composition and eventually the quality too. The quality of fruits and vegetables has a dominant effect on the market value and marketability. Therefore, the objective quality determination plays a dominant, important role for the retailers and for the consumers. Several methods were developed for quality determination of horticultural products during the last decades. These methods can be divided into destructive and non-destructive methods. According to the recent trends, the demand for fast and objective non-destructive methods increases. Firmness is one of the quality parameters of fruits and vegetables, which is the primary quality parameter from the consumers' point of view. According to the situation mentioned above, new non-destructive methods, the acoustic and impact stiffness methods were used in this thesis work.

The main goals of this thesis work were the applicability expansion of the acoustic stiffness measuring method for horticultural products, the methodological analysis of the impact stiffness measuring method, measurement of stiffness changes of carrot caused by heat treatment determined by the use of acoustic and impact methods, and the in-vivo tomato stiffness determination by the use of acoustic stiffness measuring method.

According to the results, the acoustic stiffness measuring method was found to be suitable for the determination of the softening phenomena of individual pepper samples during post-harvest period. The product characteristic frequency peak of the measured acoustic response can be well separated from the other frequency peaks. One dominant frequency peak can be obtained by the excitation on the top of the pepper berry. In contrast to this, by the excitation on the shoulder part, other frequency peak can be seen (probably because of the excitation of other vibrational modes). There is no significant difference between the acoustic stiffness coefficients obtained by the excitation on the top and shoulder part of the berry. Because of the earlier mentioned observations it is advisable to excite the pepper berry on the top part. Results of the Finite Element Modelling also supported that the stiffness change of pepper is characterised by the change of resonance frequency and there is a quadratic relationship between the two parameters ( $S \sim f^2$ ). The results of the storage experiments supported also that the acoustic method is suitable for the determination of the stiffness of paprika and it is able to follow the paprika softening during storage.

It was determined by the methodological examination of the impact method that depending on the measuring conditions the impactor's velocity has an effect on the impact stiffness coefficient in case of viscoelastic materials. In case of my measurements carried out with pepper and tomato, the

change of impact stiffness coefficient caused by impact velocity was found to be negligible. In case of further measurements with other horticultural products, this effect was found to be 6-7 % depending on the variability of the manually carried out measurement. The impact stiffness coefficient's value depends on the material of the impactor's head. Accordingly, the product is measured to be softer by measuring its stiffness with a softer impactor head than by measuring its stiffness with a metal impactor head of similar geometry. The results gained by the use of soft impactor head included all the information, which can be gained by the use of metal impactor head. The main advantage of the use of soft impactor head is that the repeated impacts caused tissue change can be reduced, so it provides with the possibility for less harmful measuring process.

Impact and acoustic stiffness measuring method were also found to be suitable for the determination of the changes of carrot samples caused not only by storage but heat treatment. Results show that the different stiffness coefficients measured by the two different dynamic methods characterise different mechanical properties. Close relationship was found between the results gained by the impact stiffness measurement and the traditional firmness measurement. The acoustic and the impact stiffness coefficient characterised the global firmness and the surface firmness of the samples, respectively. They showed different change during heat treatment. The carrot sample's surface showed a constant rate of softening due to the microwave heat treatment. In contrast to this, as a function of the used amount of microwave energy, the acoustic stiffness coefficient's change and the impedance change of the carrots slices can be estimated by a logistic function.

Summarising the results of the in-vivo measurements, the acoustic method was found to be suitable for measuring the stiffness changes of tomato during fruit development and ripening. This is due to that this method is non-destructive and it has high sensitivity. In case of tomato, the excitation along the equator and the detection at the opposite side of it were found to be a suitable measurement set-up. Using this set-up, an obvious and disturbance free acoustic response can be detected. Ansys Finite Element Modelling software was used for the selection of the suitable acoustic stiffness coefficient. The resonance frequency change during fruit development and softening can be characterised by an inverse ( $f \sim d^{-1}$ ) and a quadratic function ( $f \sim \sqrt{S}$ ). Taking in to account the above mentioned information, the changes during development can be determined by the calculation of  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  and  $S_3 = f^2 \cdot d^2$ . The  $S_1 = f^2 \cdot m$  was not found to be suitable for following the stiffness changes during fruit development. However, all the three acoustic stiffness coefficients were found to be suitable for the characterisation of fruit softening. Therefore, in case of in-vivo measurement the  $S_2$  and  $S_3$  formulas can be used for tomato stiffness calculation. According to the results, the tomato fruit is under continuous softening during fruit development and ripening. Having reached a certain time and age during development, the fruit stiffness rapidly decreases. In the very same physiological phase the colour of the crops changed from green to red.

## 8 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Mérési elrendezést és módszert alakítottam ki paprika akusztikus módszerrel történő keménységmérésére. Bizonyítottam, hogy a kapott hangválaszból a paprika jellemző frekvenciája jól detektálható, világosan elkülöníthető a többi frekvencia csúctól.
2. Kísérlettel és végeelem modellezéssel igazoltam, hogy az akusztikus gerjesztés hatására kialakuló rezonancia-frekvencia változása tükrözi a paprika keménységváltozását, így alkalmas a paprikaegyedek puhulásának követésére. A végeelem módszer eredményei alapján megállapítottam, hogy a paprika modell rezonancia-frekvencia változásának négyzete arányos a keménység (Young modulus) változásával. ( $f^2 \sim S$ )
3. Igazoltam, hogy az akusztikus és az ütésvizsgálati módszerrel mért keménységek eltérő mechanikai tulajdonságot jellemeznek hőkezelt sárgarépa esetén is; az akusztikus módszerrel mért jellemző a minta globális keménységét, míg az ütésvizsgálati módszerrel kapott jellemző a minta felületi keménységét jellemzi. Szoros összefüggést ( $R^2=0,79$ ) találtam viszont az ütésvizsgálati módszerrel és a hagyományos, kompressziós keménységméréssel kapott eredmények között.
4. Meghatároztam a sárgarépa mikrohullámú hőkezelése hatására bekövetkező akusztikus keménységtényező-változás, illetve a répakorongokon mért impedancia-változás folyamatát. A paraméterek változása a közölt energia függvényében logisztikus függvénnyel írható le. Meghatároztam a leíró modell paramétereit a vizsgált mintákra.
5. Megállapítottam, hogy az ütésvizsgálati kalapács sebessége viszkoelasztikus anyagok esetében hatással van az ütésvizsgálati keménységtényezőre. Ez a hatás faj- és fajtafüggő. A paprika és paradicsom esetében az ütési sebesség okozta ütésvizsgálati keménységtényező-változás az esetek többségében nem haladta meg az 1 %-ot, az alma, illetve a hagyma esetében ez a hatás a kézi mérés sebesség-variabilitásától függően maximum 7 % volt.
6. Az ütésvizsgálati módszer esetében az ütüfej anyaga befolyásolja a kapott ütésvizsgálati keménységtényezőt (deformálódó ütüfej alkalmazása nyilván kisebb eredő keménységtényezőt eredményez). Bizonyítottam azonban, hogy ha a minta fokozott érzékenysége megköveteli a rugalmas ütüfej alkalmazását, a kapott eredmény ekkor is hordozza mindazon információt, amit a nem deformálódó fejjel kaphatunk, így alkalmas osztályozásra, illetve a változások követésére.
7. Mérési elrendezést és módszert alakítottam ki tövön lévő paradicsom növekedése és érése során bekövetkező keménységváltozás in-vivo mérésére akusztikus módszerrel. Bizonyítottam, hogy a jellemző frekvenciacsúcs egyértelműen elkülöníthető a többi rezgési csúctól, továbbá, hogy a kapott jel nagyfokú reprodukálhatóságot ( $R^2=0,98$ ) mutat.

8. A paradicsom in-vivo mérése során megállapítottam, hogy a bogyó akusztikus keménységtényezője a fejlődés és az érés teljes folyamatában csökken. A puhulás időbeli változása nem egyenletes, a fejlődés meghatározott szakasza után a bogyó keménysége intenzíven csökken. Ugyanebben a szakaszban a paradicsom színe zöldről pirosra vált.
9. Végeselem modellező program eredményei alapján megállapítottam, hogy a paradicsommodell szimulált növekedése során a jellemző rezonancia frekvenciaváltozás reciprok ( $f \sim d^{-1}$ ), míg szimulált puhulása során bekövetkező változás négyzetgyök ( $f \sim \sqrt{S}$ ) függvényvel írható le. Ezek alapján megállapítottam, hogy a növekedés alatti változás az  $S_2 = f^2 \cdot m^{2/3}$  illetve az  $S_3 = f^2 \cdot d^2$  összefüggéssel jól követhető, míg a  $S_1 = f^2 \cdot m$  nem alkalmas a növekedés során bekövetkező keménységváltozás követésére. (Gömb és konstans sűrűség esetén az  $S_3$  ekvivalens az  $S_2$ -vel.)

## 9 IRODALOMJEGYZÉK

1. ABBOTT J. A., G. S. BACHMAN, R. F. CHIDERS, J. V. FITZGERALD, F. J. MATUSIK (1968): Sonic technique for Measuring Texture of Fruits and Vegetables. *Food Technol*, (22) 635-646 p.
2. ABBOTT, J. A. (1994): Firmness Measurement of Freshly Harvested 'Delicious' Apples by Sensory Methods, Sonic Transmission, Magness-Taylor and Compression. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 1994, 119 (3) 510-515 p.
3. ABBOTT, J. A., H. A. AFFELDT AND L. A. LILJEDAHN (1992): Firmness Measurement of Stored 'Delicious' Apples by Sensory Methods, Magness-Taylor, and Sonic Transmission. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 117 (4) 590-595 p.
4. ABBOTT, J. A., L. A. LILJEDAHN (1994): Relation of Sonic Resonant Frequency to Compression Tests and Magness-Taylor Firmness of Apples During Refrigerated Storage. *Transactions of the ASAE*, 37 (4) 1211-1215 p.
5. ABBOTT, J. A., D. R. MASSIE, B. L. UPCHURCH, W. R. HRUSCHKA (1995): Nondestructive Sonic Firmness Measurement of Apples, *Transactions of the ASAE*, 38 (5) 1461-1466 p.
6. ABBOTT, J.A. (1999): Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15 (1999) 207-225 p.
7. ABBOTT, J.A., R. LU, B. UPCHURCH, R. STROSHINE (1997): Technologies for non-destructive quality evaluation. *Horticultural Reviews*, (20), 1-120 p.
8. AMSTRONG, P., H. R. ZAPP, G. K. BROWN (1990): Impulsive Excitation of Acoustic Vibration in Apples for Firmness Determination. *Transactions of the ASAE*, 33 (4) 1353-1359 p.
9. ARANA, I., C. JARÉN, S. ARAZURI (2004): Apple mealiness detection by non-destructive mechanical impact. *Journal of Food Engineering*, 62 (2004) 399-408 p.
10. ARANA, I., M. C. SALVADORES, C. JANÉN, M. RUIZ-ALTISENT (1998): Apple mealiness and peach and nectarine wooliness detection. *AgEng, Oslo 1998*, Paper Number 98-F-076
11. ASAE STANDARD S368.4 DEC00: Compression Test of Food Materials of Convex Shape
12. BARREIRO, P. V. STEINMETZ, M. RUIZ-ALTISENT (1997): Neural bruise prediction models for fruit handling and machinery evaluation. *Computers and electronics in agriculture*, 18 (1997) 91-103 p.



13. BELLON-MAUREL, V., M. CROCHON, J. M. ROGER (2001): GLOVE: an instrumented glove to non destructively and rapidly assess fruit quality. *Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, 597-602 p.
14. BORSA, B., A. FEKETE, J. FELFÖLDI (2002): Kertészeti termékeke mechanikai és minőségi jellemzői. FVM Műszaki Intézet Gödöllő. 2002
15. BURGOS, J.A., A. GUTIERREZ, E. MOLTÓ (2002): A firmness sensor for assessing texture in fruit. *AgEng, Budapest 2002*, Paper Number 02-PH-025
16. CHEN, H., J. DE BAERDEMAEKER (1992): Effect of the Apples Shape on the Reliability of the Non-destructive Firmness Sensing. *AgEng, Uppsala 1992*, Paper Number 9211 115
17. CHEN, H., J. DE BAERDEMAEKER (1993): Finite-element-based Modal Analysis of Fruit Firmness, *American Society of Agricultural Engineers*, 36 (6) 1827-1833 p.
18. CHEN, H., J. DE BAERDEMAEKER (1993a): Effect of Apple Shape on Acoustic Measurements of Firmness. *J. agric. Engng Res.* 1993, 56 253-266 p.
19. CHEN, H., J. DE BAERDEMAEKER (1995): Optimization of Impact Parameters for Reliable Excitation of Apples During Firmness Monitoring. *J. agric. Engng Res*, 61 275-282 p.
20. CHEN, H., J. DE BAERDEMAEKER (1995a): Total Least Square Technique for Estimating the Vibration Parameters of the Apple from the Time Domain Impulse Response Signal. *J. agric. Engng Res*, 61 (4) 283-290 p.
21. CHEN, H., J. DE BAERDEMAEKER, V. BELLON (1996): Finite Element Study of the Melon for Nondestructive Sensing of Firmness. *American Society of Agricultural Engineers*, 39 (3) 1057-1065 p.
22. CHEN, P., M. RUIZ-ALTISENT (1996a): A low-mass impact sensor for high-speed firmness sensing of fruits. *AgEng, Madrid 1996*, Paper Number 96F-003
23. CHEN, P., M. RUIZ-ALTISENT, P. BARREIRO (1996): Effect of Impacting Mass on Firmness Sensing of Fruits. *American Society of Agricultural Engineers*, 39 (3) 1019-1023 p.
24. CHEN, P., Y. TJAN (1998): A Real-time Impact Sensing System for On-Line Firmness Sensing of Fruits. *AgEng, Oslo 1998*, Paper Number 98-F-006
25. CHEN, P., Z. SUN (1991): A Review of Non-destructive Methods for Quality Evaluation and Sorting of Agricultural Products. *J. agric. Engng Res*, 49 85-98 p.
26. CHEN, P., Z. SUN AND L. HUARNG (1992): Factors Affecting Acoustic Response of Apples. *Transactions of the ASAE*, 35 (6) 1915-1920 p.
27. CHERNG, AN-PAN, FENG OUYANG (2003): A Firmness Index for Fruits of Ellipsoidal Shape. *Biosystems Engineering*, 86 (1), 35-44 p.

28. CHERNG, AN-PAN, FENG OUYANG, LILIAN BLOT, REYER ZWIGGELAAR (2005): An Estimation of Firmness for Solid Ellipsoidal Fruit. *Biosystems Engineering*, 92 (2), 257-259 p.
29. CLARK, H.L, A.K. MIKELSON (1942): Fruit ripeness tester. U.S. Patent 2. 227, 037
30. COOKE, J. R. (1972): An Interpretation of the Resonant Behavior of Intact Fruits and Vegetable. *Transactions of the ASAE-1972*, 1075-1080 p.
31. CORREA. P., M. RUIZ-ALTISENT, J.L. de la PLAZA (1992): Physical parameters in relation to physiological changes of avocado during ripening (20 °C) and cold storage (6°C) in different conditions. *AgEng Uppsala 1992*, Paper Number 9211-16
32. DE BELIE, N., S. SCHOTTE, J. LAMMERTYN, B. NICOLAI, J. DE BAERDEMAEKER (2000a): Firmness changes of pear fruit on the tree with the acoustic impulse response technique. *AgEng, Warwick 2000*, Paper Number 00-PH-001
33. DE BELIE, N., S. SCHOTTE, P. COUCKE, J. DE BAERDEMAEKER (2000): Development of an automated monitoring device to quantify changes in firmness of apples during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 18 (2000b) 1-8 p.
34. DE KETELAERE, B., M. RUIZ-ALTISENT, E. C. CORREA, J. DE BAERDEMAEKER, P. BARREIRO (2001): Reliability of vibration measurements and impact response characteristics for the quality assessment of tomatoes. *Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, 487-492 p.
35. DE KETELAERE, J. DE BAERDEMAEKER (2001b): Advances in Spectral Analysis of Vibrations for Non-destructive Determination of Tomato Firmness. *J. agric. Engng Res*, 78 (2) 177-185 p.
36. DELWICHE, M.J. (1987a): Theory of Fruit Firmness Sorting by Impact Forces. *American Society of Agricultural Engineers*, 30(4) 1160-1171 p.
37. DELWICHE, M.J., T. McDONALD, S. V. BOWERS (1987) Determination of Peach Firmness by Analysis of Impact Forces. *American Society of Agricultural Engineers*, 30 (1) 249-254 p.
38. DEWULF, W., P. JANCÁSÓK, B. NICOLAI, G. DE ROECK, D. BRIASSOULIS (1999): Determining the Firmness of a Pear using Finite Element Modal Analysis. *J. agric. Engng Res*. 1999, 74 217-224 p.
39. DIEZMA, B., L. FLORES, J. DIEZ, M. RUIZ-ALTISENT, P. BARREIRO, A. MAFANÓN (2000): New version of a laboratory impact device for firmness sensing of fruits. *AgEng, Warwick 2000*, Paper Number 00-PH-036
40. FEKETE, A., J. FELFÖLDI (2002): Test methods for the assessment of tomato ripening. *Hungarian Agricultural Engineering*, 15/2002 39-40 p.

41. FELFÖLDI, J. (1996): Firmness assessment of fruits and vegetables based on acoustic parameters. *Journal of Food Physics*, (58) 39-74 p.
42. FELFÖLDI, J. (1996a): Gyümölcsök és zöldségfélék keménység-jellenzése akusztikus tulajdonságaik alapján. *Élelmiszerfizikai közlemények IX. Évfolyam Budapest*, 35-45. p.
43. FELFÖLDI, J., A. FEKETE (2000): Firmness assessment by impact method. *ASAE Annula International Meeting, Milwaukee*, Poster No. 006072, 1-7 p.
44. FELFÖLDI, J., A. FEKETE (2003): Kis mechanikai változások kimutatása akusztikus mérőrendszerrel. *MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás*, 27 (1) 76-80 p.
45. FELFÖLDI, J., A. FEKETE (2003a): Detection of Small Scale Mechanical Changes by Acoustic Measuring System. *ASAE Meeting Presentation*, Paper Number: 036097 1-8.p.
46. FELFÖLDI, J., T. IGNÁT (1999): Dynamic method for quick and non-destructive measurement of the surface firmness of fruits and vegetable. *Hungarian Agricultural Engineering*, 12 29-30 p.
47. FELFÖLDI, J., V. MUHA, G. TÓTA (2004): Finite Element Method for Validation of Interpretation of Sample Vibrations. *The 6<sup>th</sup> International Conference on Food Physics and Dairy Sciences, Pécs Hungary*, 27-28 p.
48. FINNEY, E. E. JR. (1970): Mechanical Resonance within Red Delicious Apples and Its Relation to Fruit Texture. *Transactions of the ASAE 1970*, 177-180 p.
49. GARCÍA, J.L., M. RUIZ-ALTISENT, P. BARREIRO (1995): Factors Influencing Mechanical Properties and Bruise Susceptibility of Apples and Pears. *J. agric. Engng Res.* 1995, 61 11-18 p.
50. GARCÍA-RAMOS, J., J. GIL-SIERRA, J. ORTIZ-CANAVATE, P. BARREIRO, M. RUIZ-ALTISENT, I. HOMER (2000): A procedure for testing padding materials in fruit packing. *AgEng, Warwick 2000*, Paper Number 00-PH-042
51. GARCÍA-RAMOS, J., J. ORTIZ-CANAVATE, M. RUIZ-ALTISENT, J. DÍEZ, L. FLORES, I. HOMER, J.M. CHÁVEZ (2003): Development and implementation of an on-line impact sensor for firmness sensing of fruits. *Journal of Food Engineering*, 58 (2003) 53-57 p.
52. GATCHALIAN, M. M., S. Y. DE LEON (1994): Measurement of Young Coconut (*Cocos nucifera*, L.) Maturity by Sound Waves. *Journal of Food Engineering*, 23 (1994) 253-276 p.
53. GÓMEZ, A.H., J. WNAG, A.G. PEREIRA (2005): Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 35 (2005) 209-215 p.

54. HARKER, F.R., J. MAINDONALD, S.H. MURRAY, F.A. GUSON, I.C. HALLETT, S.B. WALKER (2002): Sensory interpretation of instrumental measurements 1: texture of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 24 (2002) 225-239 p.
55. HOMER, I., J. ORTIZ-CANAVATE, G. MOREDA, S. MORABITO, M. RUIZ-ALTISENT (2002): Evaluation of a Non-destructive Impact Sensor On-line for Determination of Firmness of Peach and Apples. *AgEng Budapest 2002*, Paper Number 02-PH-026
56. IGNÁT, T., D. TOMPOS, K. TÓTH (2003a): Effect of pruning methods and growing conditions on texture of pepper. *Slovenská Zeleninárska Unia Slovenská Poľnohospodárska a Potravinárska Komora Celostátny odborný seminár zelenionárov Slovenska Nitra*, 24-26p.
57. IGNÁT, T., J. FELFÖLDI, P. M. GILINGERNÉ (2003): Fizikai és beltartalmi jellemzők alkalmazása paprika minőségi becslésére. *MTA Agrár Műszaki Bizottsága, Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás*, 27 (3) 61-65 p.
58. ISTECLA, S., D. TOMPOS, T. IGNÁT (2003): A paprika keménységének vizsgálata roncsolásmentes fizikai módszerekkel, különböző termesztési módoknál. *MTA Agrár Műszaki Bizottsága Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás*, 27 (2) 157-161 p.
59. JANCZÓK, P. T., L. CLIJMANS, B. M. NICOLAI, J. DE BAERDEMAEKER (2001a): Investigation of the effect of shape on the acoustic response of 'conference' pears by finite element modelling. *Postharvest Biology and Technology*, 23 1-12 p.
60. JANCZÓK, P., J. LAMMERTYN, B. M. NICOLAI, J. DE BAERDEMAEKER (2001): Internal defect detection of pears by impulse response method. *Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, 469-474 p.
61. JARÉN, C., E. GARCÍA-PARDO (2002): Using non-destructive impact testing for sorting fruits. *Journal of Food Engineering*, 53 (2002) 89-95 p.
62. JARÉN, C., M. RUIZ-ALTISENT (1996): Effect of Impacting Radius of Curvature on Firmness sensing of fruits in a sorting system. *AgEng, Madrid 1996*, Paper Number 96F-001
63. KIMMEL, E., K. PELEG, S. HINGA (1992): Vibration Modes of Spheroidal Fruits. *J. agric. Engng Res*, 52, 201-213 p.
64. LANDAHL, S., J. DE BAERDEMAEKER (2001): Dependence of stiffness measured with the acoustic impulse response technique on state of development of apples (2001): *Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, 475-480 p.
65. LANGENAKENS, J. J., X. VANDEWALLE, J. DE BAERDEMAEKER (1997): Influence of Global Shape and Internal Structure of Tomatoes on the Resonant Frequency. *J. agric. Engng Res*. 1997, 66 41-49 p.

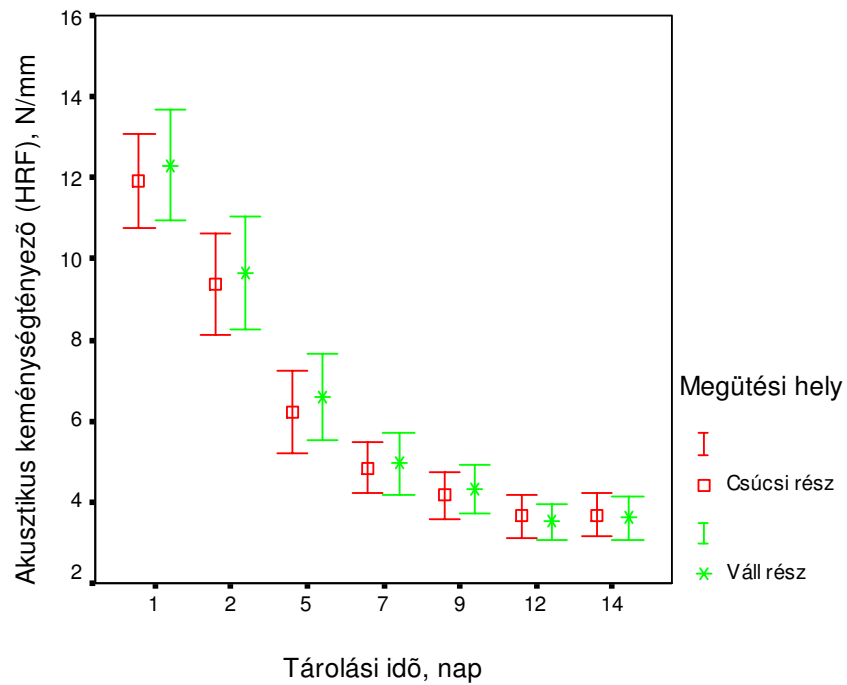
66. LILJEDAHN, L. A., J. A. ABBOTT (1994): Changes in Sonic Resonance of 'Delicious' and 'Golden Delicious' Apples Undergoing Accelerated Ripening. *Transactions of the ASAE*, 37 (3) 907-912 p.
67. McGLONE, V.A., P.N. SCHAARE (1998): Design and performance of a fruit firmness grader. *Acta Horticulturae* 464 (1998) 417-422 p.
68. MÉSZÁROS, P., E. VOZARY, D.B. FUNCK (2003): Elektromos impedancia paraméterek változása gyümölcsszáritás folyamán. 5. Száritási szimposium, Szeged
69. MÉSZÁROS, P., E. VOZARY, D.B. FUNCK (2005): Connection between moisture content and electrical parameters of apple slices during drying. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 1(2005), 95-121 p.
70. MOLTÓ, E., E. SELFA, R. PONS, I. FORNES (1996): Non destructive measuring of firmness using impact sensors. *AgEng Madrid 1996*, Paper Number 96F-014
71. MURAMATSU, N., N. SAKURAI, R. YAMAMOTO, D. J. NEVINS, T. TAKAHARA, T. OGATA (1997): Comparison of non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement of kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology*, 12 (1997) 221-228 p.
72. ORTIZ, C., P. BARREIRO, E. CORREA, F. RIQUELME, M. RUIZ-ALTISENT (2001): Non-destructive Identification of Wooly Peaches using Impact Response and Near-Infrared Spectroscopy. *J. agric. Engng Res*, 78 (3) 281-289 p
73. ORTIZ-CANAVATE, J., I. HOMER, F. J. GARCÍA-RAMOS (2001): Determination of firmness in a fruit packing line using a non-destructive impact sensor. *Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, 457-462 p.
74. OZER, N., B.A. ENGEL, J.E. SIMON (1998): A Multiple Impact Approach for Non-destructive Measurement of Fruit Firmness and Maturity. *American Society of Agricultural Engineers*, 41(3) 871-876. p.
75. PÁLFI, E., P. M. GILINGER, M. VERES BÁLINT, T. IGNÁT, J. FELFÖLDI (2004): Storability of Paprika types. *Second Central European Congress on Food, Budapest*, 269. p.
76. PATEL, N., A. McGLONE, P. SCHAARE (1993): "Berrybounce": A technique for the rapid and non-destructive measurement of firmness in small fruit. *Acta Horticulturae*, 352 189-198 p.
77. PELEG, K. (1993): Comparison of Non-destructive and Destructive Measurement of Apple Firmness. *J. agric. Engng Res*, 55, 227-238 p.
78. POLDERDIJK, J.J., R.M. KHO, A.P.M. de KRUIF, Y. CARMÍ (1999): Firmness of mangoes (*Mangifera indica* L.) measured acoustically, mechanically and manually. *Acta Horticulturae*, 509 861-865 p.

79. ROSENFELD, D., I. SHMULEVICH, G. ROSENHOUSE (1992): Three-Dimensional Simulation of the Acoustic Response of Fruit for Firmness Sorting. *American Society of Agricultural Engineers*, 35 (4) 1267-1274 p.
80. RÓTH, E., E. KOVÁCS, J. FELFÖLDI (2004): The Effect of Growing System on the Storability of Apple. *Acta Alimentaria*, (33) 1, 79-86 p.
81. RUIZ-ALTISENT, M., F. RIQUELME (2000): Instrumental quality assessment of fresh peaches: Optical and mechanical parameters. *AgEng Warwick 2000*, Paper Number 00-PH-005
82. RUMSEY, T.R., R.B. FRIDLEY (1977): Analysis of viscoelastic contact stresses in agricultural products using a finite-element method. *Transactions of ASAE*, 20(1) 162-171 p.
83. SALVADORES, M.C., C. JARÉN, I. ARANA, M. MARANÓN (2000): Apples Mealiness Detection by Mechanical Impacts. *AgEng Warwick 2000*, Paper Number 00-PH-026
84. SASS PÁL (1986): Gyümölcstárolás, Mezőgazda könyvkiadó, Budapest
85. SCHOTTE, S., N. DE BELIE, J. DE BAERDEMAEKER (1999): Acoustic impulse-response technique for evaluation and modeling of firmness of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 17 (1999) 105-115 p.
86. SEMINIS-KATALÓGUS 2005-2006. Seminis Hungária Vetőmag Kft. Budapest
87. SHMULEVICH, I., N. GALILI, M.S. HOWARTH (2002): Nondestructive Impact and Acoustic Testing For Quality Assessment of Apples. *AgEng Budapest 2002*, Paper Number 02-PH-030
88. SHMULEVICH, I., N. GALILI, R. YECHIELI (2001): Nondestructive quality assessment of mango fruit by a low-mass impulse technique. *Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*, 481-492 p.
89. SHMULEVICH, I., N. GLILI, M.S. HOWARTH (2003): Nondestructive dynamic testing of apples for firmness evaluation. *Postharvest Biology and Technology*, 23 (2003) 287-299 p.
90. SHMULEVICH, I., R. BEN-ARIE, N. SENDLER, Y. CARMI (2003b): Sensing technology for quality assessment in controlled atmospheres. *Postharvest Biology and Technology*, 23 (2003) 145-154 p.
91. SHMULEVICH, I. (1995): Non-destructive firmness testing based on fruit frequency analysis. Symposium on non-destructive firmness testing, 1-7 p.
92. STEINMETZ, V., E. BIAVATI, R. PONS, E. MOLTÓ (1996a): Non destructive determination of quality in peaches with a multisensor approach. *AgEng, Madrid 1996*, Paper Number 96F-006

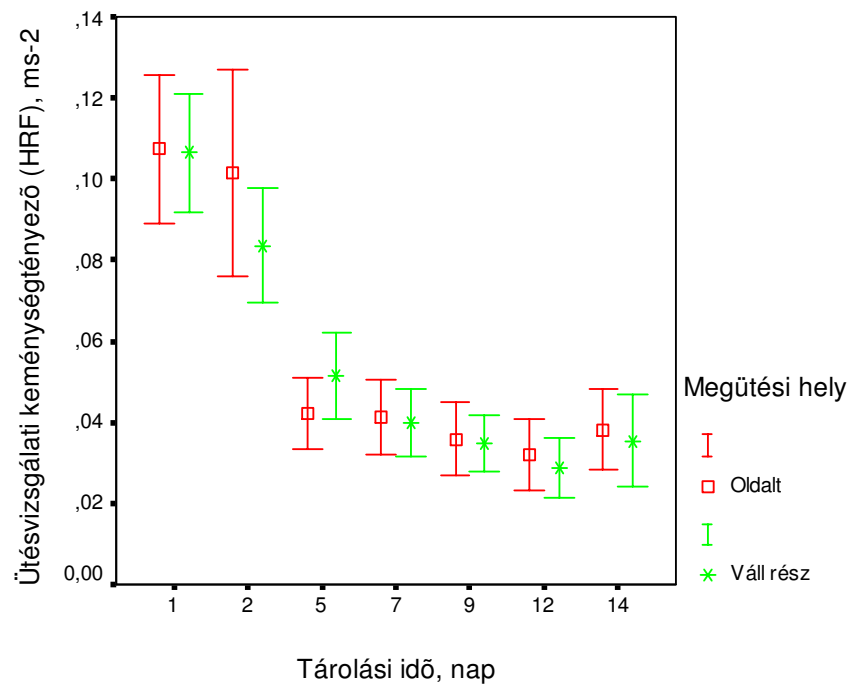
93. STEINMETZ, V., M. CROCHON, V. B. MAUREL, J.G. FERNANDEZ, P.B. ELORZA, L. VERSTREKEN (1996): Sensors for Fruit Firmness Assessment: comparison and Fusion. *J. agric. Engng Res.* 1996, 64 15-28 p.
94. SUGIYAMA, J. K. OTOBE, S. HAYASHI, S. USUI (1994): Firmness Measurement of Muskmelons by Acoustic Impulse Transmission. *Transactions of the ASAE*, 37 (4) 1235-1241 p.
95. SUGIYAMA, J., T. KATSURAI, J. HONG, H. KOYAMA, K. MIKURIYA (1998): Melon Ripeness Monitoring by a Portable Firmness Tester. *Transactions of the ASAE*, 41 (1) 121-127 p.
96. TERASAKI, S., N. SAKURAI, J. ZEBROWSKI, H. MURAYAMA, R. YAMAMOTO, D. J. NEVINS (2006): Laser Doppler vibrometer analysis of change in elastic properties of ripening 'La France' pears after postharvest storage. *Postharvest Biology and Technology*, (42) 198-207 p.
97. TERASAKI, S., N. WADA, N. SAKURAI, N. MURAMATSU, R. YAMAMOTO, D.J. NEVIS (2001): Nondestructive Measurement of Kiwifruit Ripeness Using a Laser Doppler Vibrometer. *Transactions of the ASAE*, 44(1) 81-87 p.
98. TOMPOS, D., S. ISTECLA, T. IGNÁT (2003): Assessment of fruit firmness of pepper using non-destructive physical measurements, in response to different growing and pruning technologies. *International Journal of Horticultural Science*, 9 (1) 71-76 p.
99. VANDEWALLE, X., J. DE BAERDEMAEKER AND E. SCHREVEENS (1994): Non-destructive, *On-plant Monitoring of the Firmness of Apples and Tomatoes. Cost 94 Post-Harvest Treatment of Fruit and Vegetables Workshop on "Quality Criteria", April 19-21 (1994), Bled, Slovenia*, 1-8 p.
100. YOUNCE, F.L., D.C. DAVIS (1995): A Dynamic Sensor for Cherry Firmness. *American Society of Agricultural Engineers*, 38 (5) 1467-1476 p.
101. YOUNG, Y. C., W. K. BILANSKI (1979): Modes of Vibration of Spheroids at the First and Second Resonant Frequencies. *Transactions of the ASAE-1979*, 1463-1466. p.
102. ZHANG, X., M.L. STONE, D. CHEN, N.O. MANESS, G.H. BRUSEWITZ (1994): Peach Firmness Determination by Puncture Resistance, Drop Impact, and Sonic Impulse. *American Society of Agricultural Engineers*, 37 (2) 495-500 p.

## 10 MELLÉKLET

### 10.1 Paprika tárolás alatti változása

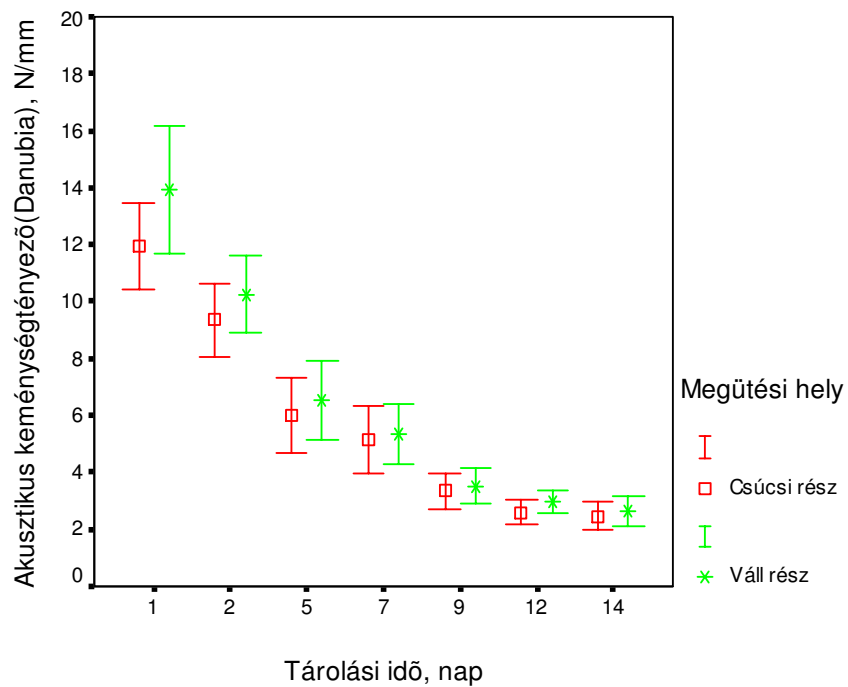


72. ábra: Az akusztikus vizsgálat eredménye HRF fajta esetében (tárolás 18°C-on)

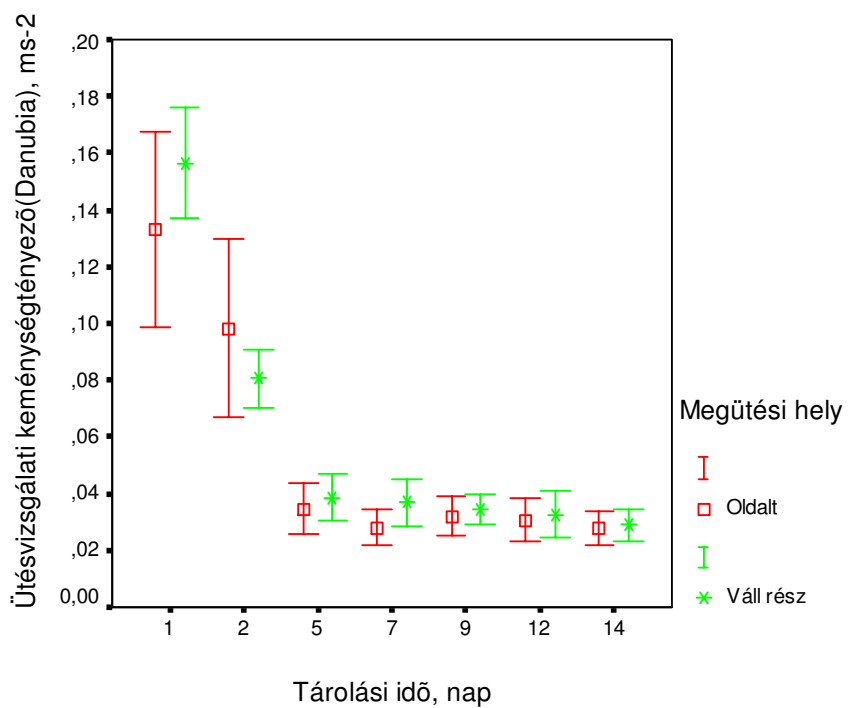


73. ábra: Impact ütésvizsgálat eredménye HRF fajta esetében (tárolás 18°C-on)

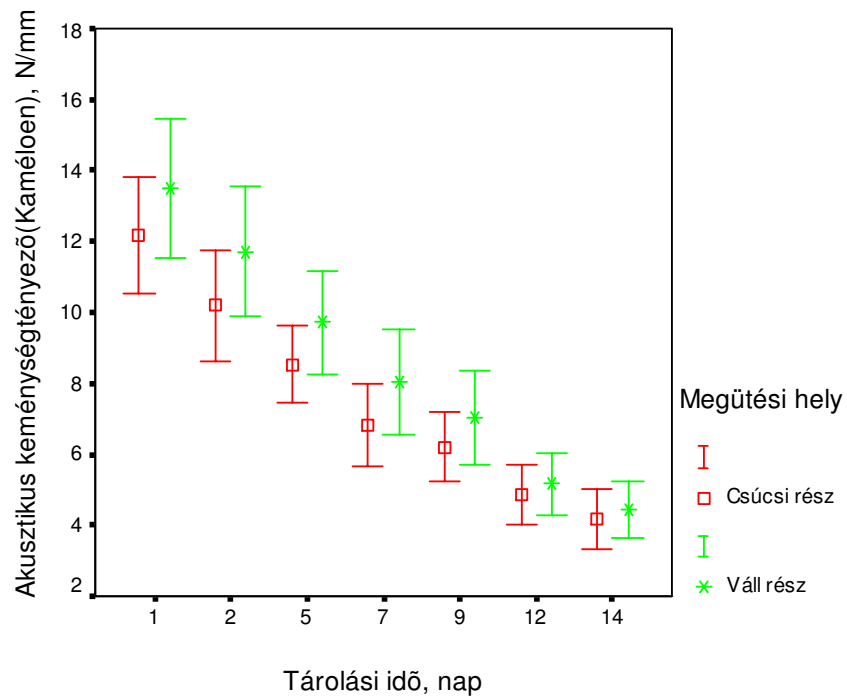




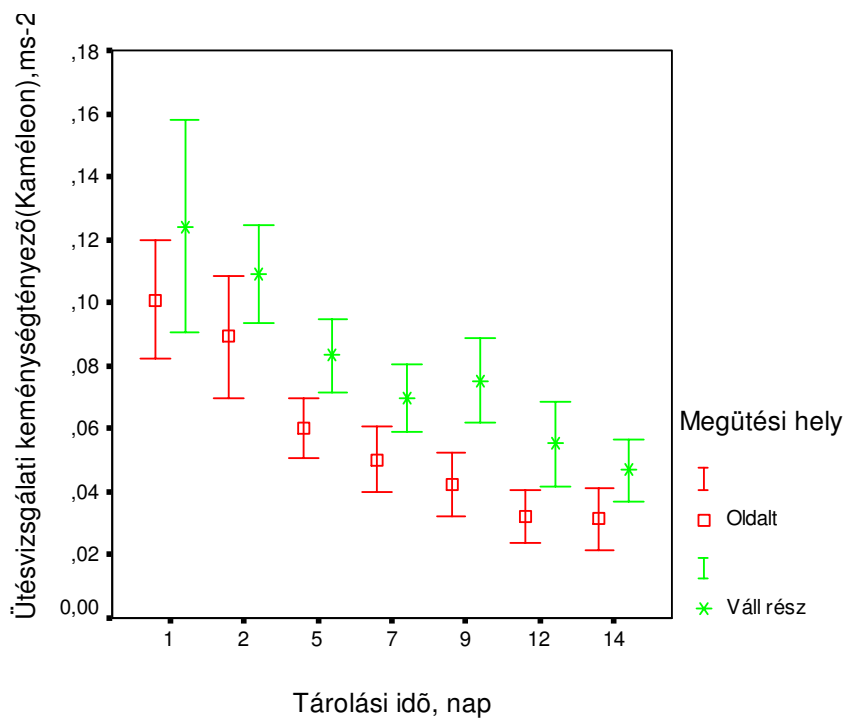
**74. ábra:** Az akusztikus vizsgálat eredménye Danubia fajta esetében (tárolás 18°C-on)



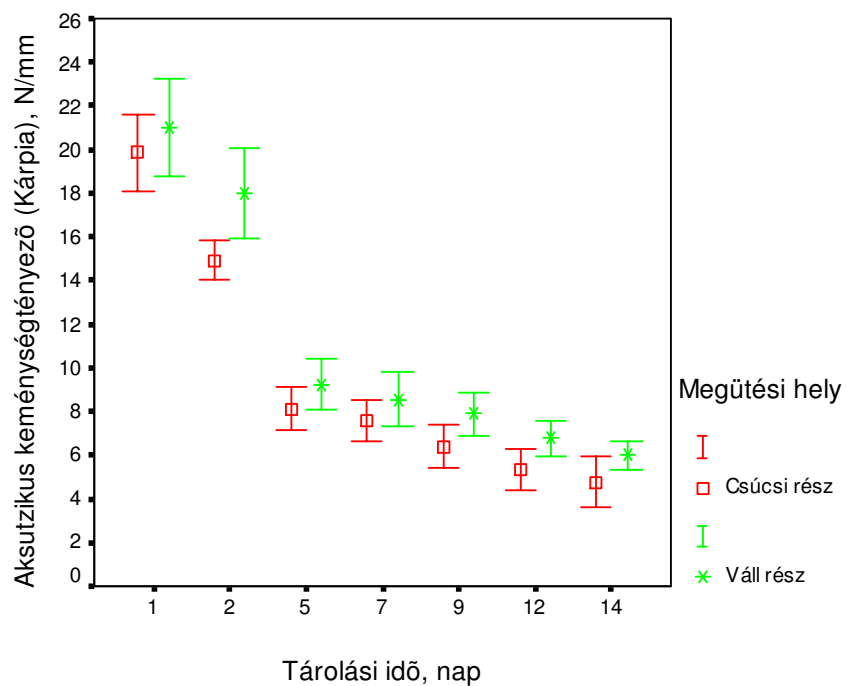
**75. ábra:** Impact ütésvizsgálat eredménye Danubia fajta esetében (tárolás 18°C-on)



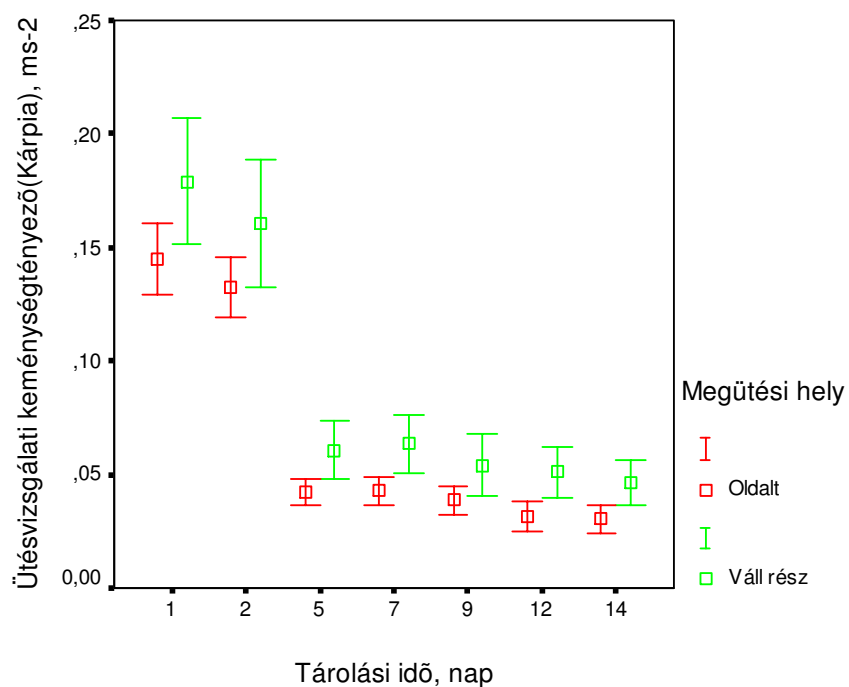
**76. ábra:** Az akusztikus vizsgálat eredménye Kaméleon fajta esetében (tárolás 18°C-on)



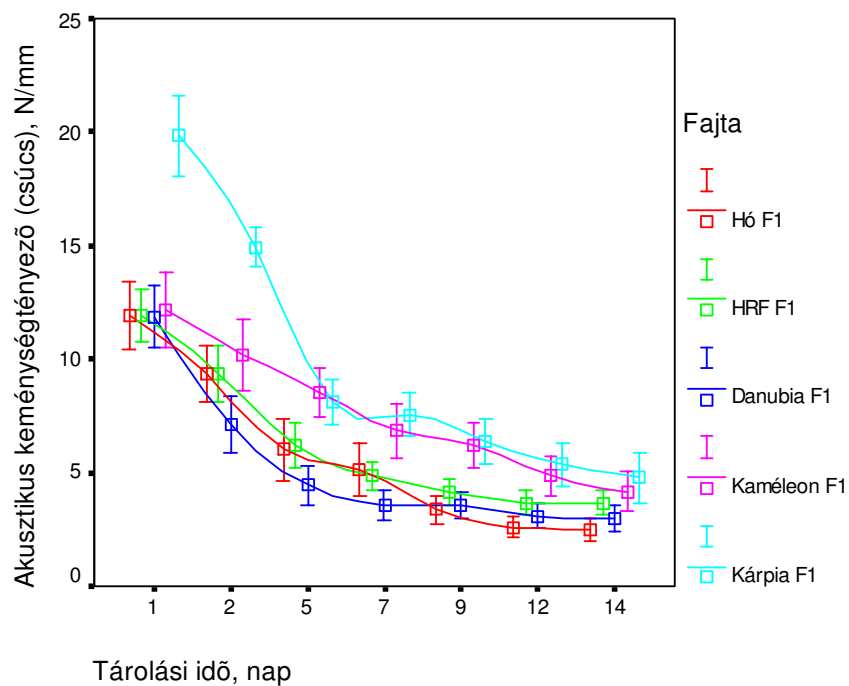
**77. ábra:** Impact ütésvizsgálat eredménye Kaméleon fajta esetében (tárolás 18°C-on)



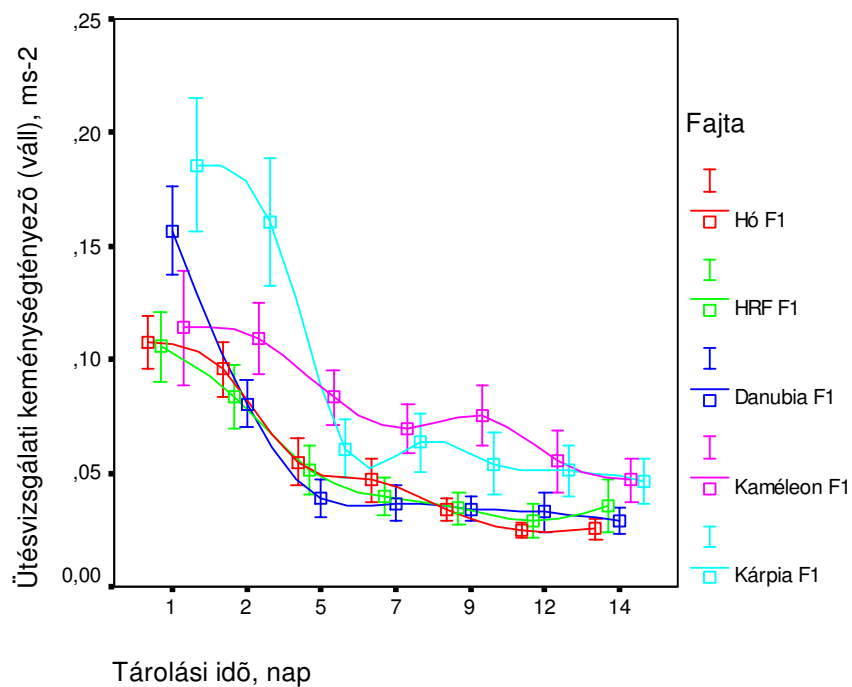
**78. ábra:** Az akusztikus vizsgálat eredménye Kárpia fajta esetében (tárolás 18°C-on)



**79. ábra:** Impact ütésvizsgálat eredménye Kárpia fajta esetében (tárolás 18°C-on)



**80. ábra:** A paprikafajták akusztikus keménységtényezőjének változása a kísérlet során (megütés a bogyó csúcsi részén, 18 °C-on való tárolás során)



**81. ábra** A paprikafajták ütésvizsgálati keménységtényezőjének változása a kísérlet során (megütés a bogyó vállrészén, 18 °C-on való tárolás során)

## 10.2 Hibaterjedési törvény térfogatszámításra

A  $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{\text{átmérő}_1}{2} \cdot \frac{\text{átmérő}_2}{2} \cdot \frac{\text{magasság}}{2}$  képlet segítségével számítottam ki a térfogatot. Az 1 mm pontossáig megadott méretekből adódó mérési hiba 99,7 %-os szignifikancia szinten a következő:  $\pm 3\sigma_{d_1} = 10^{-3}$  m,  $\pm 3\sigma_{d_2} = 10^{-3}$  m, és  $\pm 3\sigma_h = 10^{-3}$  m, ahol  $d_1$  az első,  $d_2$  a második átmérő és  $h$  pedig a magasság. Felírva erre a hibaterjedési törvényt, a következőt kapjuk:

$$\sigma_v^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial d_1}\right)^2 \cdot \sigma_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial d_2}\right)^2 \cdot \sigma_{d_2}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 \cdot \sigma_h^2. \quad \text{Elvégezve a deriválásokat az alábbi}$$

$$\sigma_v^2 = \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \frac{h}{2}\right)^2 \cdot \sigma_{d_1}^2 + \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d_1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2}\right)^2 \cdot \sigma_{d_2}^2 + \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d_1}{2} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \frac{1}{2}\right)^2 \cdot \sigma_h^2 \quad \text{egyenlethez}$$

jutunk hozzá. Ha egy átlagos paradicsomot vizsgálunk, aminek a méretei legyenek, pl.  $d_1=60$  mm,  $d_2=60$  mm,  $h=45$  mm, akkor az előbbi egyenlet a behelyettesítés és kiszámítás után a következő:

$$\sigma_v^2 = (1,414 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (1,667 \cdot 10^{-4})^2 + (1,414 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (1,667 \cdot 10^{-4})^2 + (1,885 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (1,667 \cdot 10^{-4})^2,$$

$$\sigma_v^2 = 2,097 \cdot 10^{-13} \text{ m}^6 \quad \text{tehát} \quad \sigma_v = 4,579 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3. \quad \text{Tehát ennek az átlagosnak mondható paradicsomnak a térfogata 99,7 %-os megbízhatósági szinten a következő:}$$

$$V = 8,482 \cdot 10^{-5} \pm 1,373 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3.$$

## 10.3 Hibaterjedési törvény tömegbecslésre

A sűrűség az érési idő alatt durván  $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ -t változott. Ezért a sűrűségváltozás hibája 99,7 %-os szignifikancia szinten  $\pm 3\sigma_\rho = 20 \cdot 10^3 \text{ g/m}^3$ . Mivel ismert, hogy  $m = \rho \cdot V$  ezért a hibaterjedési

$$\text{törvény a következőképpen írható fel: } \sigma_m^2 = \left(\frac{\partial m}{\partial \rho}\right)^2 \cdot \sigma_\rho^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial V}\right)^2 \cdot \sigma_v^2. \quad \text{Deriválás után a}$$

következőt kapjuk:  $\sigma_m^2 = V^2 \cdot \sigma_\rho^2 + \rho^2 \cdot \sigma_v^2$ . Ha előzőekben használt térfogatot, tehát  $8,482 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ -t és egy átlagos sűrűséget, pl.  $985 \text{ kg/m}^3$ -t használunk a számításához, akkor a behelyettesítés és a kiszámítás után ezt kapjuk:  $\sigma_m^2 = 7,994 \cdot 10^{-2} + 2,034 \cdot 10^{-1}$ . Az első tag a sűrűségváltozás hibájából keletkezett, míg a második a geometriai paraméterek méretek lemérésének hibájából. Látható, hogy a térfogatbecslésének hibája 2,5-ször nagyobb, mint a sűrűségváltozásból adódó hiba. A tömegbecslés hibája  $\sigma_m^2 = 0,2834 \text{ g}^2$ , azaz  $\sigma_m = 0,5323 \text{ g}$ . Tehát ilyen paraméterű paradicsom tömege 99,7 %-os biztonsággal  $83,55 \pm 1,597 \text{ g}$ , ami azt jelenti, hogy a tömeg  $\pm 1,91$  tehát kb.  $\pm 2\%$ -os hibával becsülhető.

#### 10.4 A gömb alakú test rezonancia frekvenciájának változása a szimulált növekedés során

**11. táblázat:** A gömb alakú test rezonancia frekvenciájának változása a szimulált növekedés során

Átmérő, mm	Rezonancia frekvencia, Hz				
	7. módus	8. módus	9. módus	10. módus	11. módus
20	1721,849453	1721,869041	1721,873756	1721,882596	1721,884605
25	1377,4723	1377,488628	1377,492647	1377,494814	1377,499021
30	1147,898567	1147,913155	1147,916755	1147,919168	1147,921203
35	983,9135716	983,9271191	983,9298459	983,9319638	983,9337961
40	860,9247267	860,9345207	860,9368781	860,9412978	860,9423024
45	765,2654399	765,2774161	765,2819315	765,2823213	765,2841159
50	688,7361499	688,7443141	688,7463235	688,7474071	688,7495105
55	626,1305427	626,137478	626,1395706	626,1403464	626,1423225
60	573,9492835	573,9565774	573,9583778	573,9595842	573,9606015
65	529,7974961	529,8028549	529,8063827	529,808128	529,8088924
70	491,9567858	491,9635595	491,9649229	491,9659819	491,966898

Átmérő, mm	Rezonancia frekvencia, Hz				
	12. módus	13. módus	14. módus	15. módus	16. módus
20	1825,602546	1825,609356	1825,613485	1825,614964	1825,619997
25	1460,469519	1460,477058	1460,477428	1460,478819	1460,484876
30	1217,066664	1217,070272	1217,072335	1217,073967	1217,077803
35	1043,203553	1043,205611	1043,206865	1043,210025	1043,21217
40	912,8012732	912,8046781	912,8067425	912,8074822	912,8099987
45	811,3810996	811,3840799	811,3854506	811,3872899	811,3917958
50	730,2347597	730,2385291	730,2387138	730,2394094	730,242438
55	663,8588085	663,8594972	663,8615648	663,861991	663,8641433
60	608,533332	608,5351359	608,5361676	608,5369837	608,5389017
65	561,7219138	561,7228176	561,7235644	561,7265046	561,7273839
70	521,6017763	521,6028055	521,6034327	521,6050123	521,6060848

Átmérő, mm	Rezonancia frekvencia, Hz			
	17. módus	18. módus	19. módus	20. módus
20	2497,762863	2497,772977	2497,78986	2661,546132
25	1998,160122	1998,168836	1998,172995	2129,173595
30	1665,169556	1665,177989	1665,189392	1774,355108
35	1427,292305	1427,301469	1427,313815	1520,887585
40	1248,881431	1248,886488	1248,89493	1330,773066
45	1110,116368	1110,128548	1110,143126	1182,91715
50	999,0800612	999,0844184	999,0864979	1064,586797
55	908,2888344	908,2924637	908,2941021	967,855686
60	832,5847779	832,5889948	832,5946962	887,1775541
65	768,5263385	768,5303721	768,5378534	818,9201775
70	713,6461525	713,6507344	713,6569076	760,4437925

## 10.5 A gömb alakú test rezonancia frekvenciájának változása a szimulált puhulás során

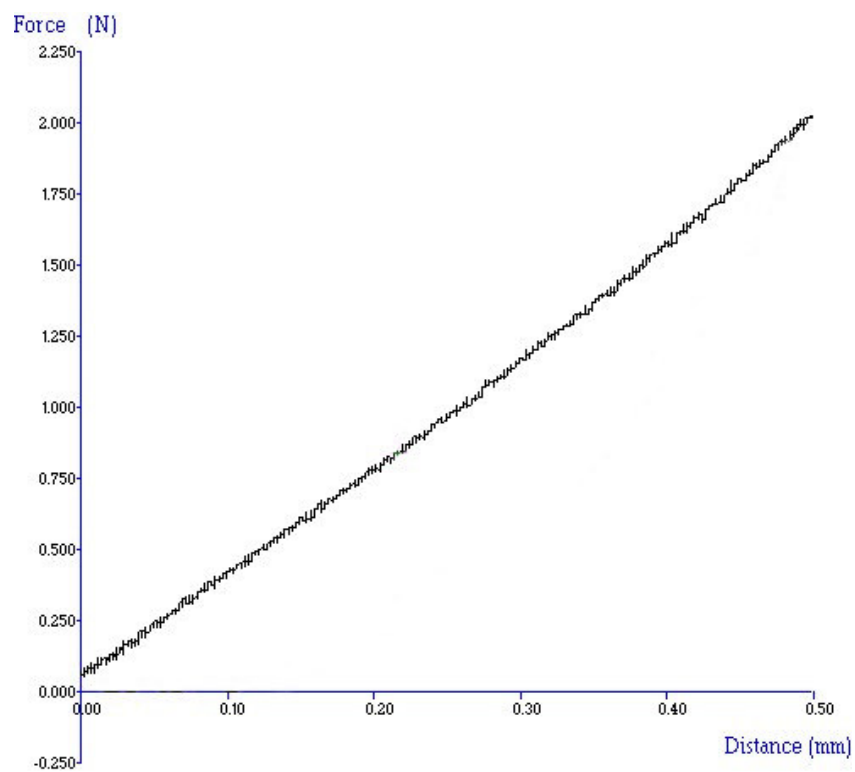
**12. táblázat:** A gömb alakú test rezonancia frekvenciájának változása a szimulált puhulás során

Young modulus, MPa	Rezonancia frekvencia, Hz				
	7. módus	8. módus	9. módus	10. módus	11. módus
4,8	562,3532	562,3603	562,3621	562,3632	562,3642
4,6	550,5128	550,5198	550,5215	550,5227	550,5237
4,4	538,4122	538,419	538,4207	538,4218	538,4228
4,2	526,0332	526,0399	526,0415	526,0426	526,0436
4,0	513,3558	513,3624	513,364	513,3651	513,366
3,8	500,3574	500,3637	500,3653	500,3664	500,3673
3,6	487,0121	487,0183	487,0198	487,0209	487,0217
3,4	473,2907	473,2967	473,2982	473,2992	473,3
3,2	459,1594	459,1653	459,1667	459,1677	459,1685
3,0	444,5792	444,5849	444,5862	444,5872	444,588

Young modulus, MPa	Rezonancia frekvencia, Hz				
	12. módus	13. módus	14. módus	15. módus	16. módus
4,8	596,2385	596,2402	596,2412	596,242	596,2439
4,6	583,6847	583,6864	583,6874	583,6882	583,69
4,4	570,8549	570,8566	570,8575	570,8583	570,8601
4,2	557,73	557,7317	557,7326	557,7334	557,7351
4,0	544,2888	544,2904	544,2913	544,292	544,2937
3,8	530,5071	530,5086	530,5095	530,5102	530,5119
3,6	516,3577	516,3592	516,3601	516,3608	516,3624
3,4	501,8094	501,8109	501,8118	501,8125	501,814
3,2	486,8267	486,8281	486,8289	486,8296	486,8311
3,0	471,3679	471,3693	471,3701	471,3707	471,3722

Young modulus, MPa	Rezonancia frekvencia, Hz			
	17. módus	18. módus	19. módus	20. módus
4,8	815,7631	815,7673	815,7729	869,2529
4,6	798,5873	798,5913	798,5968	850,9508
4,4	781,0338	781,0377	781,0431	832,2463
4,2	763,0766	763,0804	763,0856	813,1117
4,0	744,6865	744,6902	744,6953	793,5157
3,8	725,8306	725,8343	725,8392	773,4235
3,6	706,4716	706,4752	706,48	752,7951
3,4	686,567	686,5705	686,5752	731,5854
3,2	666,0678	666,0712	666,0758	709,742
3,0	644,9174	644,9207	644,9251	687,2048

## 10.6 Gumi mérőfej karakterisztikája



**82. ábra:** Gumi mérőfej karakterisztikája



## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni a szakmai segítséget és a dolgozathoz nyújtott tanácsokat

- Konzulensemnek **Dr. Felföldi Józsefnek,**
- **Dr. Fekete Andrásnak,**
- **Dr. Baranyai Lászlónak,** és
- A Budapesti Corvinus Egyetem Élelmiszertudományi Kar **Fizika-Automatika Tanszék** dolgozóinak.

Köszönettel tartozom **Zsom Lajosnak** és **Zsom Lajosnénak,** hogy lehetőséget biztosítottak az in-vivo mérések elvégzésére, továbbá, hogy lelkesen segítették munkámat.

Köszönetemet fejezem ki a Budapesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Kar **Zöldség és Gombatermesztési Tanszékének** és **Kísérleti Üzemének** a vizsgálataimban felhasznált minták biztosításáért.

Szeretném megköszönni **Dr. Karai Jánosnénak** a Karai Predoktori Ösztöndíjjal nyújtott segítségét.

Köszönet illeti **szüleimet, testvéreimet és férjemet,** hogy éveken keresztül bátorítottak és bíztattak.

**KÖSZÖNÖM!**